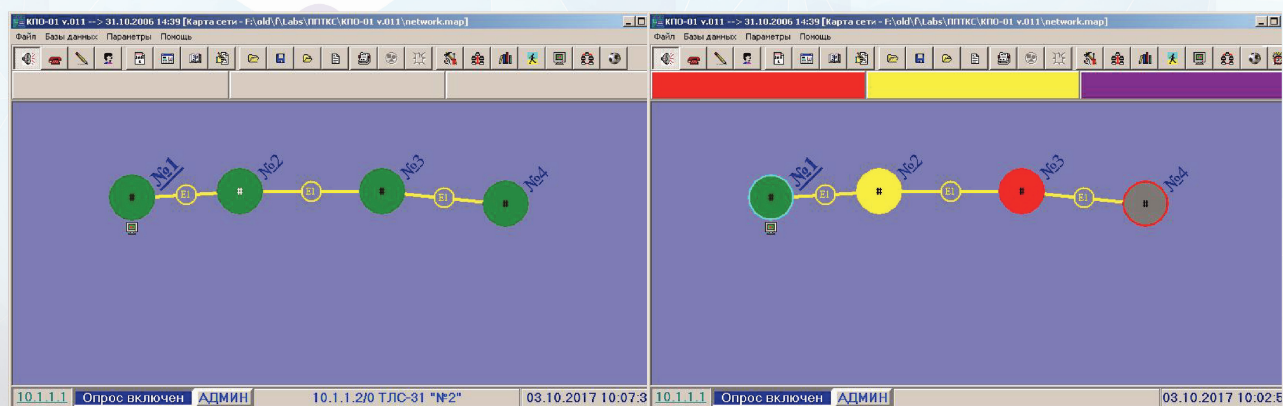


МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ



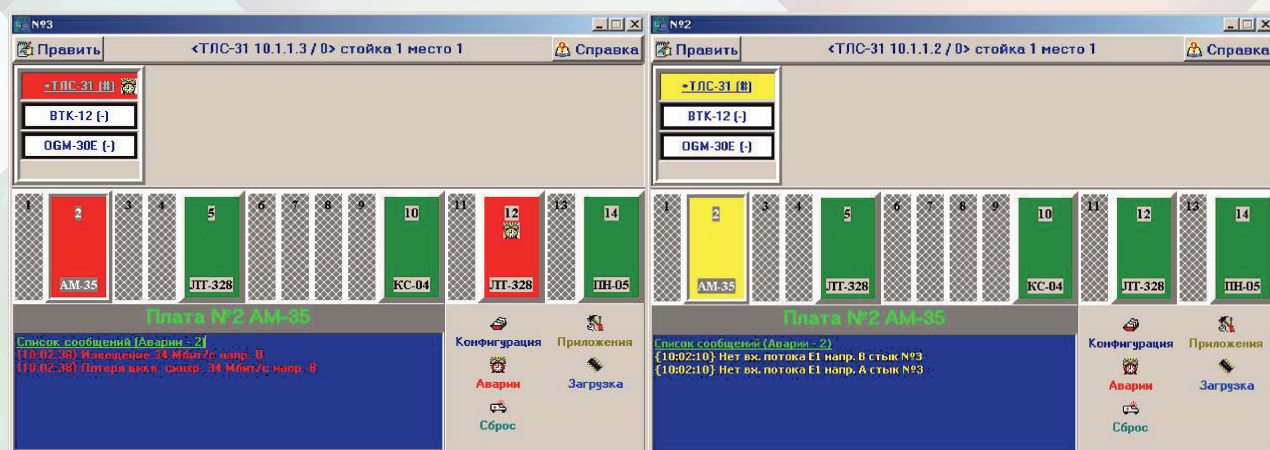
Том 19
2018
№ 2

Рисунок к статье В. И. Фреймана, А. А. Южакова
«ДИАГНОСТИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ
ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ИНФРАСТРУКТУРАМИ»



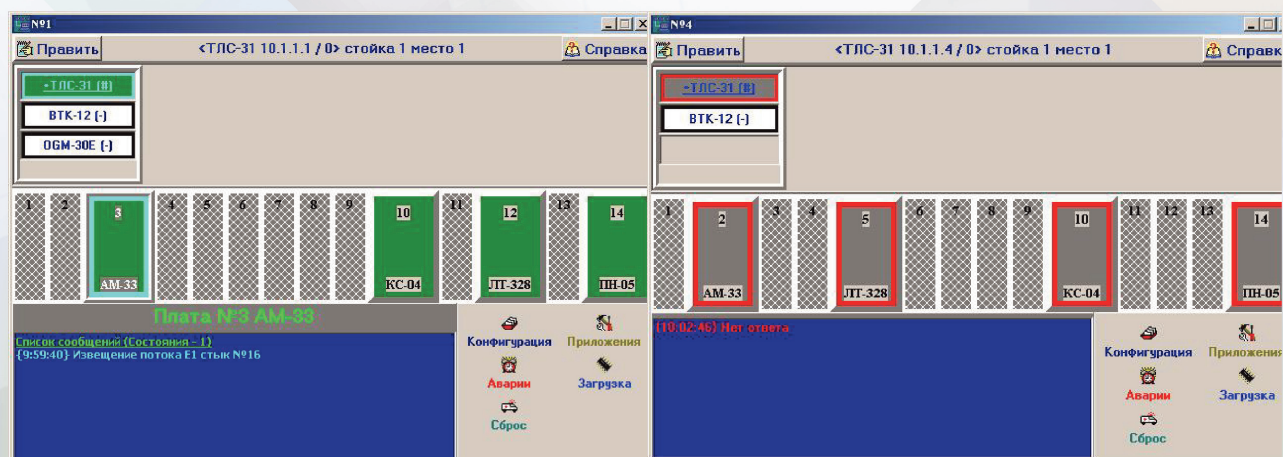
а)

б)



в)

г)



д)

е)

Рис. 5. Вид окон ИУС КПО-01 для разных видов сообщений о неисправностях

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Том 19

2018

№ 2

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.

ПШИХОПОВ В. Х., д.т.н.

РАПОПОРТ Э. Я., д.т.н.

СЕРГЕЕВ С. Ф., д.пс.н.

ФИЛАРЕТОВ В. Ф., д.т.н.

ФРАДКОВ А. Л., д.т.н.

ФУРСОВ В. А., д.т.н.

ЮРЕВИЧ Е. И., д.т.н.

Редакция:

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

Директор издательства:

АНТОНОВ Б. И.

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕМЕНТЫ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Bobtsov A. A., Nikolaev N. A., Pyrkina A. A., Slita O. V., Titova Ye. S. Rotor Position, Speed and Flux Observers for Permanent Magnet Synchronous Motors 75

Бусурин В. И., Кудрявцев П. С., Лю Чжэ. Исследование системы стабилизации сенсора бесконтактного сканирующего профилометра на основе метода оптического туннелирования 80

Фрейман В. И., Южаков А. А. Диагностирование и оценка состояния элементов систем управления распределенными инфраструктурами 86

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Филаретов В. Ф., Коноплин А. Ю., Коноплин Н. Ю. Метод супервизорного управления манипулятором подводного робота 95

Брискин Е. С., Шаронов Н. Г., Барсов В. С. Об энергетически эффективных режимах движения роботов с поворотно-заклинивающими движителями 100

Волосатова Т. М., Козов А. В. Особенности методов распознавания образов в автоматической системе управления поворотом мобильного робота 104

УПРАВЛЕНИЕ В АВИАКОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Инсаров В. В., Тихонова С. В., Дронский С. А. Концепция построения интеллектуальных систем управления автономных беспилотных летательных аппаратов с реализацией функции ситуационной осведомленности 111

Мунасыпов Р. А., Муслимов Т. З. Групповое управление беспилотными летательными аппаратами на основе метода пространства относительных состояний 120

Чекушкин В. В., Жиганов С. Н., Быков А. А., Михеев К. В. Воспроизведение траекторий движения объектов в системах контроля воздушного пространства 126

Шибанов Г. П. Учет ошибок первичных преобразователей при контроле параметров полета летательного аппарата и диагностике его бортового оборудования 134

Яскевич А. В. Уравнения динамики стыковочных механизмов. Часть 2. Алгоритмы для кинематических контуров 139

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. 2

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.

PSHIKHOPOV V. KH.

RAPOPORT E. Ya.

SERGEEV S. F.

YUREVICH E. I.

Editorial Staff:

GRIGORIN-RYABOVA E. V.

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

ELEMENTS OF MECHATRON SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

- Bobtsov A. A., Nikolaev N. A., Pyrkin A. A., Slita O. V., Titova Ye. S.** Rotor Position, Speed and Flux Observers for Permanent Magnet Synchronous Motors 75
- Busurin V. I., Kudryavtsev P. S., Liu Zhe.** Investigation of the Sensor Stabilization System for Non-Contact Scanning Profilometer Based on the Optical Tunneling Method 80
- Freyman V. I., Yuzhakov A. A.** Diagnosis and Assessment of Elements Condition of Control Systems for Distributed Infrastructures 86

ROBOTIC SYSTEMS

- Filaretov V. F., Konoplin A. Yu., Konoplin N. Yu.** A Supervisory Control Method for Manipulator Mounted on Underwater Robot 95
- Briskin E. S., Sharonov N. G., Barsov V. S.** On Energy Efficient Regimes of Robot Motion with Rotary-Wedging Propulsion Devices 100
- Volosatova T. M., Kozov A. V.** Features of Pattern Recognition Methods for the Turn Control System of Mobile Robot 104

CONTROL IN AEROSPACE SYSTEMS

- Insarov W. V., Tikhonova S. V., Dronsky S. A.** The Concept of Building Intelligent Control Systems for Autonomous Unmanned Aerial Vehicles with the Realization of the Function of Situational Awareness 111
- Munasypov R. A., Muslimov T. Z.** UAVs Group Control Based on the Relative State Space Method 120
- Chekushkin V. V., Zhiganov S. N., Bykov A. A., Miheev K. V.** The Reproduction of the Trajectories of Moving Objects in the Systems of Control of Air Space 126
- Shibanov G. P.** Account of Errors of Transducer during Inspection of Flying Device 134
- Yaskevich A. A.** Dynamic Equations of Docking Mechanisms. Part 2. Algorithms for Kinematical Loops 139

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

Rotor Position, Speed and Flux Observers for Permanent Magnet Synchronous Motors

A. A. Bobtsov, bobtsov@mail.ru, N. A. Nikolaev, nikona@yandex.ru, A. A. Pyrkin, a.pyrkin@gmail.com,
O. V. Slita, o-slita@yandex.ru, Ye. S. Titova, kattitova@bk.ru,
Department of Control Systems and Informatics, ITMO University,
Kronverksky av., 49, 197101, Saint Petersburg, Russia

Corresponding author: **Slita Olga V.**, Ph. D., Associate Professor,
Department of Control Systems and Informatics, ITMO University,
Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
e-mail: o-slita@yandex.ru

Accepted on November 01, 2017

Permanent-magnet synchronous motors (PMSM) are widely used in industry, transport and household appliances due to many advantages such as high power and payload, maintaining a constant speed at impact loads and voltage fluctuation, and high efficiency. Implementation of sensorless algorithms instead of measuring equipment may reduce the cost price of systems with PMSM. Field-oriented PMSM control requires information on rotor position and speed. Sensorless control methods replace the measured rotor position and speed with their estimates. The estimates are supposed to be obtained from the measured electrical quantities such as the motor voltages and currents. This paper continues the trend of sensorless control design and is devoted to design of rotor speed, position and flux observers for PMSM. The problem is solved under assumption that winding resistance, inductance and viscous friction coefficient are known; load torque is known or measured. In this paper the classical stationary reference frame model of the nonsalient PMSM is used. A simple speed observer is designed using linear filtration of known signals. The necessary condition for the convergence of the speed estimate is given and proved. Reparameterised model of PMSM and estimated rotor speed are used to design the position and flux observers. The proposed algorithms have simple structures and fast convergence. The theoretical results are proved by system simulation in MATLAB. Estimations of rotor speed, position and flux are conducted for different values of viscous friction coefficient and constant and harmonic load torque.

Keywords: induction motor, rotor flux estimation, speed estimation, position estimation

Acknowledgements: This paper was partially financially supported by Government of Russian Federation (Grant 074-U01), by the Ministry of Education and Science of Russian Federation (Project 14.Z50.31.0031) and by the Russian Federation President Grant № 14. Y31.16.9281-HH.

For citation:

Bobtsov A. A., Nikolaev N. A., Pyrkin A. A., Slita O. V., Titova Ye. S. Rotor Position, Speed and Flux Observers for Permanent Magnet Synchronous Motors, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 2, pp. 75–79.

DOI: 10.17587/mau.19.75-79

1. Introduction

Permanent-magnet synchronous motors (PMSM) are widely used in industry (cranes, vacuum pumps, elevators), transport (airplanes) and household appliances (refrigerators, vacuum cleaners, air conditioners, washing mashines) due to many advantages such as high power and payload, maintaining a constant speed at impact loads and voltage fluctuation, and high efficiency. PMSMs have been employed in various applications due to its high power density, low inertia, high reliability, and fast response. Field-ori-

ented PMSM control requires information on rotor position and speed. The position θ can be measured using a shaft-mounted optical encoder and resolvers. If this is known, the speed of the motor can be calculated directly by $\dot{\theta}$ differentiation. Generally, the encoder is sensitive to vibrations, increases the cost of the machine and may not run well at high speed. Thus, design features of industrial devices do not allow installation of speed or position sensors. Installation of mechanical position sensors increases the cost and maintenance requirement and also reduces the robustness and reliability. For household appliances the use of sensorless algorithms instead of measuring equipment may reduce the cost price. Sensorless control methods replace the measured rotor position and speed with estimates. The estimates are supposed to be obtained from the measured electrical quantities (usually, the motor voltages and currents) [19], [20]. The parameters of the motor can be estimated by offline methods, then we get very accurate values of those parameters. But offline methods ignore any changes, which may occur when the device is active. Online estimation of parameters during identification

also has many complications, which we do not have to deal when using offline methods. The identification with a lock rotor cannot be used, large changes in control are not desirable and foremost a signal contains a large amount of noise, which complicates the identification [18]. Nowadays permanent-magnet synchronous motors are often controlled with sensorless algorithms [1], [16], [21]. A recent review of the literature can be found, for instance, in [22], [23], [1]. In some of the works devoted to sensorless control rotor position and speed are estimated [2], [3], [4], [5], [16], [19] others are devoted to estimation of electrical parameters — winding resistance and inductance [6], [7], [8], [9], [10], [17], [18]. This work continues the trend set in [3], [15]. In this paper we consider the following problems: observation of rotor speed, position and flux for PMSM with known constant parameters (winding resistance and inductance). Speed estimation is conducted for known time-varying load torque. Position and flux observer use estimated rotor speed. The remainder of the paper is organized as follows. Section 2 presents the classical model of the PMSM and formulates speed, rotor position and flux observation problems. Section 3 contains the simple speed observer, reparameterisation of PMSM and rotor position and flux observers design. Simulation results are presented in Section 4.

2. PMSM model and problem statement

The classical fixed reference frame ($\alpha\beta$) model of the nonsalient PMSM is given by [3], [12], [13], [15].

$$L \frac{di_{\alpha\beta}}{dt} = -Ri_{\alpha\beta} - \lambda_m n_p \omega J_a C_a + u_{\alpha\beta}; \quad (2.1)$$

$$J\dot{\omega} = \lambda_m n_p i_{\alpha\beta}^T J_a C_a - \tau_L - k_f \omega, \quad (2.2)$$

where $J_a = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$, $i_{\alpha\beta} = \text{col}(i_\alpha, i_\beta)$, and $u_{\alpha\beta} = \text{col}(u_\alpha, u_\beta)$ are the stator current and motor terminal voltage, respectively, ω is the rotor speed, L is the stator inductance, R is the stator resistance, n_p is the number of pole pairs, J is the moment of inertia (normalized with n_p), $k_f \geq 0$ is the viscous friction coefficient, λ_m is the constant flux generated by permanent magnets, τ_L is the load torque and $C_a = \text{col}(\cos(n_p\theta), \sin(n_p\theta))$.

The main contribution of the paper is the solution of the following problems: design and investigation of the simple speed, position and flux observers for PMSM, assuming that the motor resistance, inductance, viscous friction coefficient and load torque are known.

3. Speed estimator of PMSM

3.1. Assumptions

In the design of the speed observer, the following assumptions are imposed:

Assumption 1 The load torque τ_L is known or measured.

Assumption 2 The stator inductance L , the stator winding resistance R , the rotor inertia J , the number of pole pairs n_p and the viscous friction coefficient k_f are known constants.

3.2. Speed Observer Design for known and time-varying τ_L

Equation (2.1) can be rewritten as

$$Li_{\alpha\beta}^T \frac{di_{\alpha\beta}}{dt} = -Ri_{\alpha\beta}^T i_{\alpha\beta} - \lambda_m n_p \omega i_{\alpha\beta}^T J_a C_a + i_{\alpha\beta}^T u_{\alpha\beta}. \quad (3.3)$$

If τ_L is time-varying and known, then from (2.2) we have

$$\lambda_m n_p i_{\alpha\beta}^T J_a C_a = J\dot{\omega} + k_f \omega + \tau_L. \quad (3.4)$$

Substituting (3.4) into (3.3) we obtain

$$Li_{\alpha\beta}^T \frac{di_{\alpha\beta}}{dt} = -Ri_{\alpha\beta}^T i_{\alpha\beta} - \omega(J\dot{\omega} + k_f \omega + \tau_L) + i_{\alpha\beta}^T u_{\alpha\beta}. \quad (3.5)$$

Let us introduce two variables:

$$\begin{cases} q_1 = \frac{1}{2} i_{\alpha\beta}^T i_{\alpha\beta}; \\ q_2 = \frac{1}{2} \omega^2. \end{cases} \quad (3.6)$$

Then (3.5) can be rewritten as

$$L\dot{q}_1 + 2Rq_1 + J\dot{q}_2 + 2k_f q_2 = i_{\alpha\beta}^T u_{\alpha\beta} - \tau_L \omega. \quad (3.7)$$

From (3.7) we can find

$$q_2 = \frac{1}{Jp + 2k_f} \left(i_{\alpha\beta}^T u_{\alpha\beta} - \tau_L \omega \right) - \frac{Lp + 2R}{Jp + 2k_f} q_1, \quad (3.8)$$

where p is differential operator.

Rewrite (3.8) in compact form

$$q_2 = H(p)\tau_L \sqrt{2q_2} + \varsigma, \quad (3.9)$$

where

$$H(p) = \frac{1}{Jp + 2k_f}$$

$$\text{and } \varsigma = \frac{1}{Jp + 2k_f} i_{\alpha\beta}^T u_{\alpha\beta} - \frac{Lp + 2R}{Jp + 2k_f} q_1.$$

Proposition 1. Consider observer for (3.9)

$$\hat{q}_2 = H(p)\tau_L \sqrt{2\hat{q}_2} + \varsigma. \quad (3.10)$$

The necessary condition for the convergence of the estimate is $k > 0$ and $\omega + \hat{\omega} > 0$. From (3.6) and (3.10) we have

$$\hat{\omega} = \sqrt{2\hat{q}_2}. \quad (3.11)$$

Proof of the Proposition 1.

Consider error $e = \hat{\omega} - \omega$, then

$$\begin{aligned}\hat{\omega}^2 - \omega^2 &= -2kH(p)\hat{\omega} + 2kH(p)\omega = -2kH(p)e; \\ (\omega + e)^2 - \omega^2 &= 2e\omega + e^2 = -2kH(p)e.\end{aligned}\quad (3.12)$$

Then for (3.12) we have

$$\begin{aligned}e^2 + 2e\omega &= -2kH(p)e, \\ e(e + 2\omega) &= e(\hat{\omega} + \omega) = -2kH(p)e.\end{aligned}\quad (3.13)$$

Consider equations (3.12) and (3.13), then we can write

$$e(t)(\hat{\omega} + \omega) = -\frac{k_1}{p + k_2} \tau_L(t)e(t). \quad (3.14)$$

Let us denote $\beta(t) = \hat{\omega} + \omega$, $r(t) = \beta(t)e(t)$.

Then we can rewrite (3.14) in form

$$\begin{aligned}r(t) &= -\frac{k_1}{p + k_2} \tau_L(t)e(t), \quad (p + k_2)r(t) = -k_1 \tau_L(t)e(t), \\ \dot{r}(t) &= -k_2 r(t) - k_1 \tau_L(t)e(t) = \\ &= -k_2 r(t) - k_1 \tau_L(t)\beta^{-1}(t)r(t).\end{aligned}\quad (3.15)$$

From (3.15) we have a new stability condition

$$k_2 + k_1 \tau_L(t)\beta^{-1}(t) > 0, \quad k_2 > k_1 \tau_L(t)\beta^{-1}(t). \quad (3.16)$$

3.3. Rotor Position Observer Design for known and time-varying τ_L

Suppose rotor speed ω is known.

For classical fixed-frame $\alpha\beta$ PMSM model we have

$$\dot{\lambda} = u_{\alpha\beta} - Ri_{\alpha\beta}, \quad (3.17)$$

where $\lambda \in R^2$ is the total flux.

For surface mounted PMSMs the total flux verifies

$$\lambda = Li_{\alpha\beta} + \lambda_m C_a. \quad (3.18)$$

Equation (3.17) can be rewritten as [15]

$$\lambda = \eta + z_1 - Rz_2. \quad (3.19)$$

where $z_1 = \frac{1}{p} u_{\alpha\beta}$, $z_2 = \frac{1}{p} i_{\alpha\beta}$, $z_1 = \int_0^t u_{\alpha\beta} ds$, $z_2 = \int_0^t i_{\alpha\beta} ds$,

p is differentiation operator and $\eta = [\eta_1 \quad \eta_2]^T$ is vector of unknown constants.

For derivative of (3.18) we have

$$\dot{\lambda} = Lpi_{\alpha\beta} + n_p \omega J_a \lambda_m C_a = u_{\alpha\beta} - Ri_{\alpha\beta}. \quad (3.20)$$

Let us rewrite (3.18) in the following form

$$\lambda_m C_a = \lambda - Li_{\alpha\beta}. \quad (3.21)$$

Substituting (3.21) into (3.20) we obtain

$$Lpi_{\alpha\beta} + n_p \omega J_a (\lambda - Li_{\alpha\beta}) = u_{\alpha\beta} - Ri_{\alpha\beta}. \quad (3.22)$$

Substituting (3.18) into (3.22) we receive

$$Lpi_{\alpha\beta} + n_p \omega J_a (\eta + z_1 - Rz_2 - Li_{\alpha\beta}) = u_{\alpha\beta} - Ri_{\alpha\beta}. \quad (3.23)$$

After simple transformation of (3.23) we have

$$\begin{aligned}(Lp + R)i_{\alpha\beta} &= u_{\alpha\beta} - n_p \omega J_a (\eta + z_1 - Rz_2 - Li_{\alpha\beta}); \\ i_{\alpha\beta} &= \frac{1}{Lp + R} (u_{\alpha\beta} - n_p \omega J_a (z_1 - Rz_2 - Li_{\alpha\beta})) - \\ &\quad - \frac{1}{Lp + R} (n_p \omega J_a \eta).\end{aligned}\quad (3.24)$$

Let us introduce two variables

$$g_1 = i_{\alpha\beta} - \frac{1}{Lp + R} (u_{\alpha\beta} - n_p \omega J_a (z_1 - Rz_2 - Li_{\alpha\beta})); \quad (3.25)$$

$$g_2 = \frac{1}{Lp + R} \omega. \quad (3.26)$$

Consider (3.25) and (3.26). Then we can rewrite (3.24) in the following form

$$g_1 = -n_p J_a \eta g_2 = \gamma g_2, \quad (3.27)$$

where $\gamma = -n_p J_a \eta$ is unknown.

For estimation of unknown γ we can use the following algorithm

$$\dot{\hat{\gamma}} = \gamma_a (-g_2^2 \hat{\gamma} + g_1 g_2), \quad (3.28)$$

where γ_a is a positive constant.

Then for estimate of total flux we have

$$\hat{\lambda} = z_1 - Rz_2 - \hat{\eta}, \quad (3.29)$$

where

$$\hat{\eta} = -n_p^{-1} J_a^{-1} \hat{\gamma}. \quad (3.30)$$

Now we can estimate PMSM rotor position. From (3.18) we have

$$C_a = \frac{\hat{\lambda} - Li_{\alpha\beta}}{\lambda_m}. \quad (3.31)$$

From (3.31) we can derive

$$\begin{aligned}\cos(n_p \theta) &= \lambda_m^{-1} (\hat{\lambda} - Li_{\alpha}), \\ \hat{\theta} &= n_p^{-1} \arccos \left(\lambda_m^{-1} (\hat{\lambda} - Li_{\alpha}) \right).\end{aligned}\quad (3.32)$$

If rotor speed is known, then we can use (3.25)–(3.32) for identification of PMSM unknown parameters (total flux and rotor position). If rotor speed is unknown we can use (3.25)–(3.32) substituting ω with $\hat{\omega}$ (3.11).

4. Simulation results

For simulation we use parameters of the motor BMP0701F as in [2], [14]. Parameters of PMSM are listed in Table 1.

Simulation results are shown in Fig. 4.1–4.4.

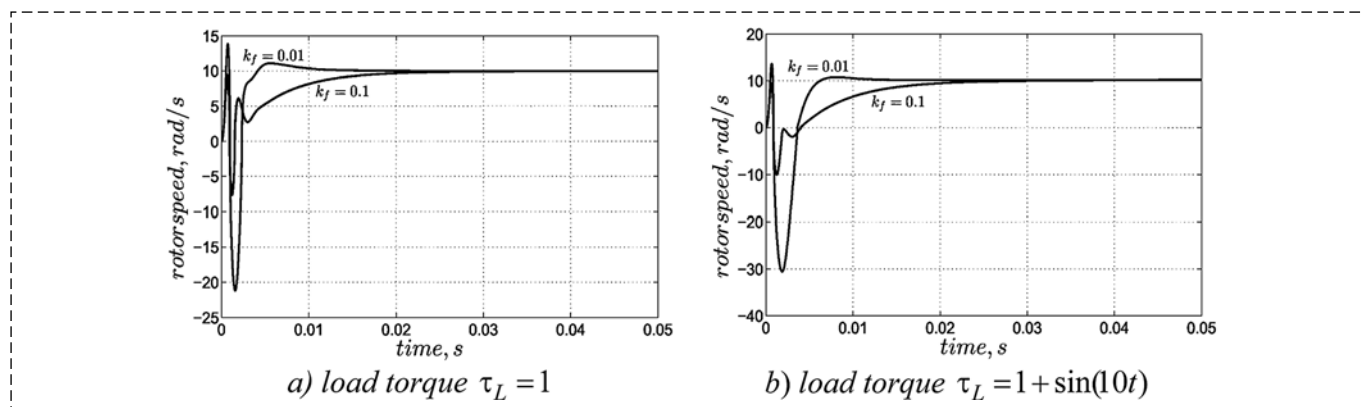


Fig. 4.1. Estimate of rotor speed $\hat{\omega}$, with rotor reference speed $\omega = 10$ rad/s

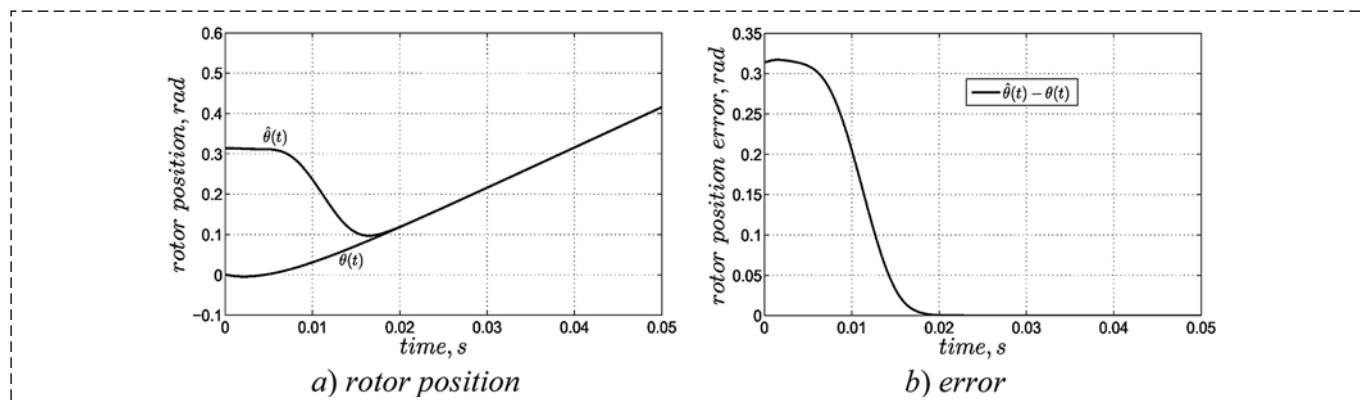


Fig. 4.2. Estimation of rotor position, with rotor reference speed $\omega = 10$ rad/s, viscous friction coefficient $k_f = 0.1$ and load torque $\tau_L = 1$

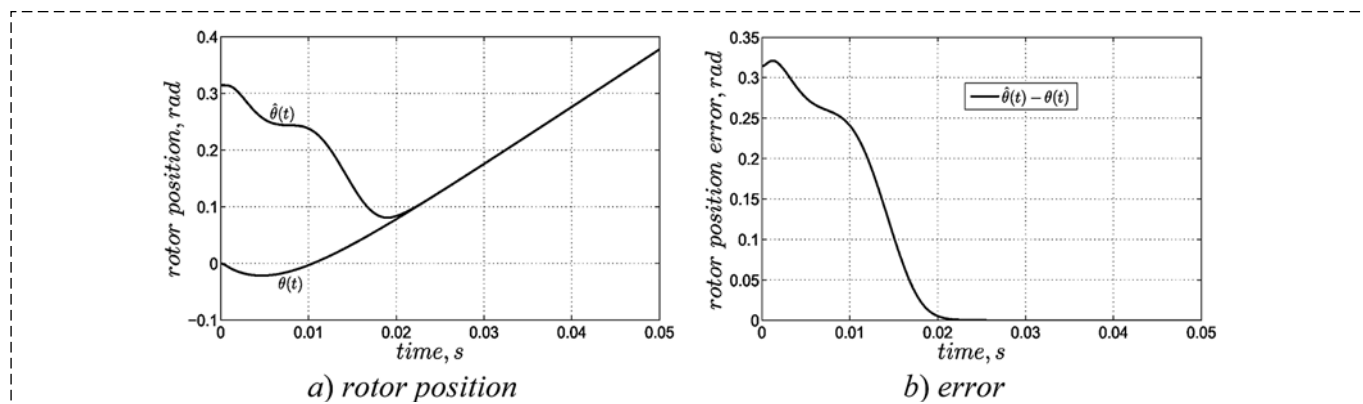


Fig. 4.3. Estimation of rotor position, with rotor reference speed $\omega = 10$ rad/s, viscous friction coefficient $k_f = 0.1$ and load torque $\tau_L = 1 + \sin(10t)$

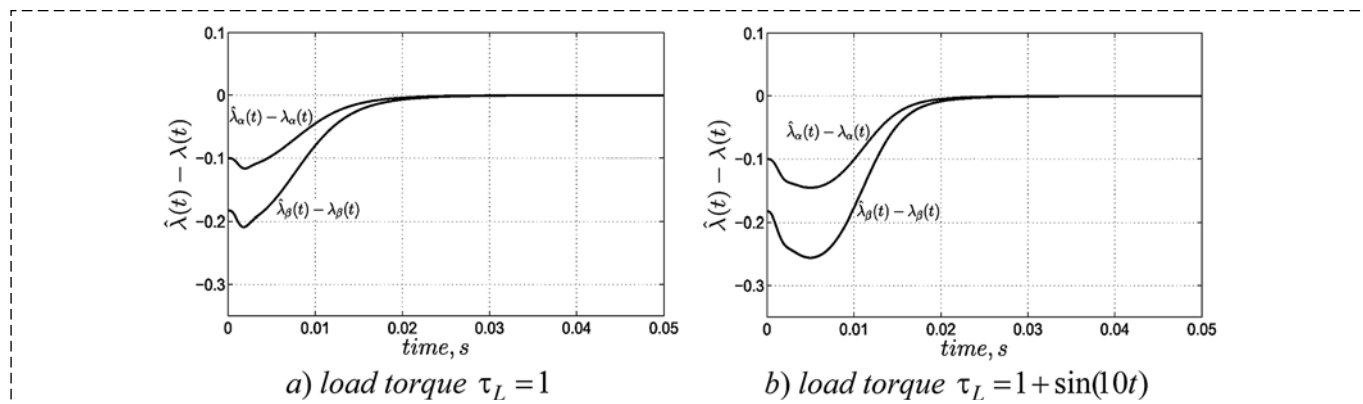


Fig. 4.4. Error of total flux estimation, with rotor reference speed $\omega = 10$ rad/s, viscous friction coefficient $k_f = 0.1$

Table 4.1

Parameters of the PMSM BMP07F1

Parameter (units)	Value
Inductance L (mH)	40,03
Resistance (Ω)	8,875
Drive inertia J (kg·m ²)	$60 \cdot 10^{-6}$
Pairs of poles n_p (-)	5
Magnetic flux (Wb)	0,2086

Fig. 4.1 demonstrates the transients of PMSM rotor speed observer $\hat{\omega}$ for reference rotor speed $\omega = 10$ rad/s and different values PMSM parameters: viscous friction coefficient ($k_f = 0.01$ and $k_f = 0.1$) and load torque ($\tau_L = 1$ and $\tau_L = 1 + \sin(10t)$).

Fig. 4.2 demonstrates the transients of PMSM rotor position $\hat{\theta}$ and rotor position error for reference rotor speed $\omega = 10$ rad/s, viscous friction coefficient $k_f = 0.1$ and load torque $\tau_L = 1$.

Fig. 4.3 demonstrates the transients of PMSM rotor position $\hat{\theta}$ and rotor position error for reference rotor speed $\omega = 10$ rad/s, $k_f = 0.1$ and load torque $\tau_L = 1 + \sin(10t)$.

Fig. 4.4 demonstrates the transients of PMSM error of total flux $\hat{\lambda} - \lambda$ for reference rotor speed $\omega = 10$ rad/s, $k_f = 0.1$ for different values of load torque ($\tau_L = 1$ and $\tau_L = 1 + \sin(10t)$).

The simulation results in Fig. 4.1–4.4 show that the estimate of PMSM observers converges to the actual PMSM values. Transients of observers have fast convergence speed.

5. Conclusion

The problem of speed, total flux and rotor position estimation for PMSM was considered. The stator winding resistance, the stator inductance, the rotor inertia, the number of pole pairs, the viscous friction coefficient, and the load torque were assumed to be known. The new speed, flux and position observers have been proposed. The design of the speed observer was conducted with the use of linear filtration of known signals. Position and flux observers design is based on reparameterisation of the classical PMSM model. Estimate of rotor speed is used for position and flux estimation. The proposed algorithms have simple structures and fast convergence.

References

1. Nam K. H. AC Motor Control and Electric Vehicle Applications, CRC Press, 2010, 449 p.
2. Bobtsov A., Bazylev D., Pyrkin A., Aranovskiy S., Ortega R. A robust nonlinear position observer for synchronous motors with relaxed excitation conditions, *International journal of control*, 2016, pp. 1–12.
3. Bobtsov A. A., Pyrkin A. A., Ortega R., Vukosavic S. N., Stankovic A. M., Panteley E. V. A Robust Globally Convergent Position Observer for the Permanent Magnet Synchronous Motor, *Automatica*, 2015, vol. 61, pp. 47–54.

4. Ortega R., Praly L., Astolfi A., Lee J., Nam K. H. Estimation of rotor position and speed of permanent magnet synchronous motors with guaranteed stability, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011, vol. 19, no. 3, pp. 601–614.
5. Tomei P., Verrelli C. Observer-based speed tracking control for sensorless permanent magnet synchronous motors with unknown torque, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, vol. 56, no. 6, pp. 1484–1488.
6. Ichikawa S., Tomita M., Doki S., Okuma S. Sensorless control of permanent magnet synchronous motors using online parameter identification based on system identification theory, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2006, vol. 53, no. 2, pp. 363–372.
7. Piippo A., Hinkkanen M., Luomi J. Adaptation of motor parameters in sensorless PMSM drives, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2009, vol. 45, no. 1, pp. 203–212.
8. Hinkkanen M., Tuovinen T., Harnefors L., Luomi J. A combined position and stator resistance observer for salient PMSM drives: Design and stability analysis, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, vol. 27, no. 2, pp. 601–609.
9. Kisek D., Chanag J., Kang D., Kim J., Anghel D. Parameter identification of permanent magnet synchronous motors for sensorless control, *Rev. Roum. Sci. Techn. Electrotechn. et Energ.*, 2010, vol. 55, no. 2, pp. 132–142.
10. Verrelli C. M., Savoia A., Mengoni M., Marino R., Tomei P., Zarri L. On-line identification of winding resistances and load torque in induction machines, *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, 2004, vol. 22, no. 4, pp. 1629–1637.
11. Bazylev D. N., Bobtsov A. A., Pyrkin A. A., Chezhin M. S. Algoritmy Identifikatsii Parametrov Sinkhronnogo Dvigatelya s Postoyannimi Magnitami (*Parameter Identification Algorithms for the Synchronous Motors with Permanent Magnets*). *Mechatronics, automation, control*, 2016, vo. 17, no. 3, pp. 193–199.
12. Chiasson J. *Modeling and high-performance Control of electric machines*, Wiley, 2005, pp. 709.
13. Shah D., Espinosa-Perez G., Ortega R., Hilaliret M. Sensorless Speed Control of Nonsalient Permanent Magnet Synchronous Motors, *Proceedings of the 18th World Congress The International Federation of Automatic Control Milano (Italy)*, 2011, pp. 11109–11114.
14. BMP synchronous motor. *Motor manual*, V1.00, 2012, Schneider Electric.
15. Bobtsov A., Pyrkin A., Ortega R. A new approach for estimation of electrical parameters and flux observation of permanent magnet synchronous motors, *Int. J. Adapt. Control Signal Process.*, 2016, vol. 30, pp. 1434–1448.
16. Wang G., Li T., Zhang G., Gui X., Xu D. Position Estimation Error Reduction Recursive-Least-Square Adaptive Filter for Model-Based Sensorless Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives, *IEEE transactions on industrial electronics*, 2014, vol. 61, no. 9, pp. 5115–5125.
17. Bech M. M., Christensen J. H., Weber M. L., Kristensen N. H. An automatic parameter identification method for a PMSM drive with LC-filter *IECON 2016 – 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2016, pp. 2678–2683.
18. Vesely I., Marcon P., Szabo Z., Zezulka F., Sajdl O. Parameter Identification of PMSM. *Progress In Electromagnetic Research Symposium (PIERS)*, Shanghai, China, 2016, pp. 2921–2925.
19. Comanescu M. Speed, Rotor Position and Load Torque Estimation of the PMSM using an Extended Dynamic Model and Cascaded Sliding Mode Observers, *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*. 2016, pp. 98–103.
20. Lee Y., Kwon Y.-Ch., Sul S.-K. Comparison of rotor position estimation performance in fundamental-model-based sensorless control of PMSM, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2015, pp. 5624–5633.
21. Rajashekara K., Kawamura A., Matsuse K. *Sensorless Control of AC Motor Drives*, IEEE Press, 1996, 497 p.
22. Acarnley P. P., Watson, J. F. Review of position-sensorless operation of brushless permanent-magnet machines, *IEEE Trans Industrial Electronics*, 2006, vol. 53, no. 2, pp. 352–362.
23. Ichikawa S., Tomita M., Doki S., Okuma S. Sensorless control of PMSM using on-line parameter identification based on systems identification theory, *IEEE Trans Industrial Electronics*, 2006, vol. 53, no. 2, pp. 363–373.

В. И. Бусурин, д-р техн. наук, проф., vbusurin@mai.ru,

П. С. Кудрявцев, канд. техн. наук, доцент, mpso121@mail.ru, Лю Чжэ, слушатель, lzg599312@hotmail.com,
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Исследование системы стабилизации сенсора бесконтактного сканирующего профилометра на основе метода оптического туннелирования

Исследуется система стабилизации положения сенсора бесконтактного сканирующего профилометра относительно исследуемой поверхности на основе оптического туннелирования. Решается задача подбора элементной базы, с помощью которой возможно реализовать необходимые требования по точности и качеству регулирования процесса перемещения сенсора. Также рассматривается и решается задача построения регулятора, компенсирующего нежелательные временные свойства контура измерений, который базируется на динамических звеньях, имеющих большие коэффициенты усиления и малые постоянные времени.

Ключевые слова: оптическое туннелирование, стабилизация, функция преобразования, профилометр, динамическая система, корректирующее звено

Введение

В профилометрах часто используют способ бесконтактного сканирования для получения данных о форме поверхности тел на основе оптических методов, например, на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ) или на основе хроматической аберрации [1, 2]. В процессе работы подобного сканирующего профилометра оптический сенсор движется вдоль тестируемой поверхности, не касаясь ее. При этом для обеспечения корректного считывания результатов измерений необходимо поддерживать зазор между оптическим сенсором и тестируемым телом постоянным и с высокой точностью, что возможно обеспечить только с помощью следящей системы. Если профиль исследуемой поверхности характеризуется перепадами высот в несколько нанометров, то для построения следящей системы можно использовать техническое решение, которое широко применяется в ближнепольной оптической микроскопии и основано на параметрической резонансной обратной связи с использованием дополнительного измерительного устройства [3]. Однако если профиль исследуемой поверхности характеризуется перепадами высот в десятки и сотни нанометров, то для построения следящей системы приходится брать информацию, получаемую непосредственно с оптического сенсора [4]. Сложности проектирования такой системы обусловлены нелинейной характеристикой сенсора, большими коэффициентами усиления преобразующих элементов и высокими требованиями к точности исполнительного устройства перемещения сенсора [1, 5]. Поэтому важными факторами успешного проектирования подобной следящей системы являются правильный выбор ее элементной базы, выбор структуры и параметров регулятора, обеспечива-

ющего требуемую динамику системы стабилизации при появления значительного перепада высот в профиле исследуемого тела.

Особенности системы стабилизации сенсора бесконтактного сканирующего профилометра

В общем виде система стабилизации субмикронного зазора на основе бесконтактного преобразователя приближения с оптическим туннелированием приведена на рис. 1.

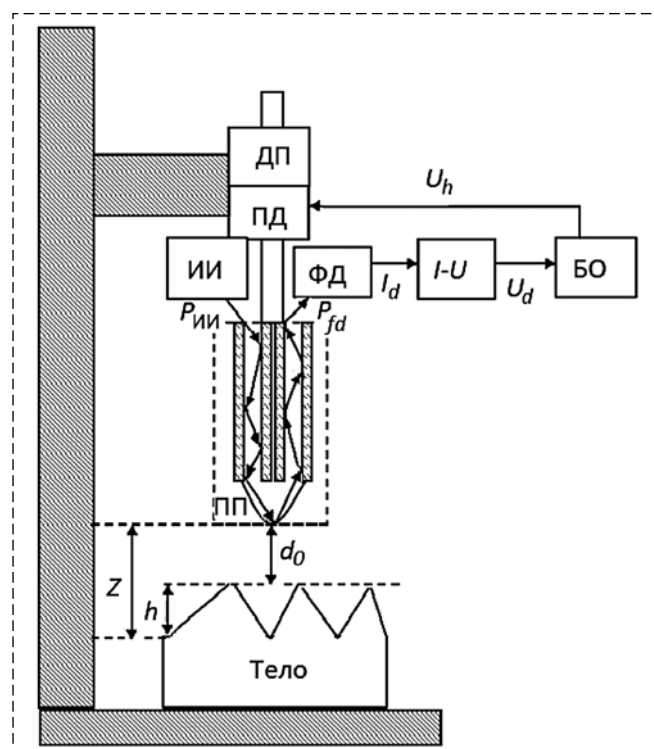


Рис. 1. Схема системы стабилизации зазора для бесконтактного сканирующего профилометра

Схема содержит следующие блоки: ИИ — источник оптического излучения; ПП — преобразователь приближения; ФД — фотоприемник; $I-U$ — преобразователь "ток—напряжение"; БО — блок обработки и управления; ПД — пьезоэлектрический двигатель; ДП — датчик перемещения. Сенсор бесконтактного профилометра движется вдоль осей OX и OY , не показанных на рис. 1. При этом поддерживается постоянным зазор d_0 между блоком ПП и исследуемой поверхностью по оси OZ . Так как зазор зависит от высоты рельефа поверхности тела, то для поддержания его постоянного значения в профилометре используют пьездвигатель перемещения блока ПП, который обеспечивает зазор на заданном уровне d_0 . В процессе работы системы стабилизации зазора бесконтактный ПП, использующий эффект оптического туннелирования, преобразует значение текущего зазора d в изменение оптического излучения P_{fd} . На основе изменения величины P_{fd} формируется напряжение обратной связи U_d , которое затем используется для управления пьездвигателем с учетом задающего напряжения U_{d_0} , линейно пропорционального значению d_0 . Одновременно датчик перемещения определяет изменение координаты по оси OZ по разности измерения текущей координаты Z и начальной координаты Z_0 , которая соответствует заданному начальному зазору d_0 и текущей высоте исследуемого рельефа h . Результаты измерения отображаются в устройстве отображения БО.

Таким образом, схему системы стабилизации зазора бесконтактного сканирующего профилометра на основе ОТЭ можно представить в виде, приведенном на рис. 2.

Рассмотрим особенности функционирования приведенной системы стабилизации. Обычно в качестве преобразователя приближения используется кварцевый сферический элемент на основе оптического туннельного эффекта [2—4]. Зазор d между сенсором и поверхностью тестируемого тела может меняться при движении сенсора над поверхностью тела. Уменьшение зазора приводит ко все большему поглощению оптической энергии тестируемым телом, т. е. к уменьшению выходного сигнала фотоприемника сенсора. На рис. 3 показан типовой график изменения отра-

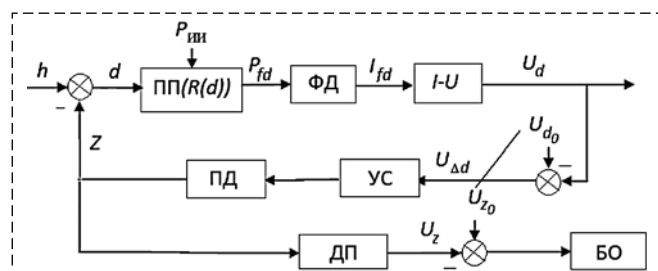


Рис. 2. Схема системы стабилизации зазора бесконтактного сканирующего профилометра на основе ОТЭ

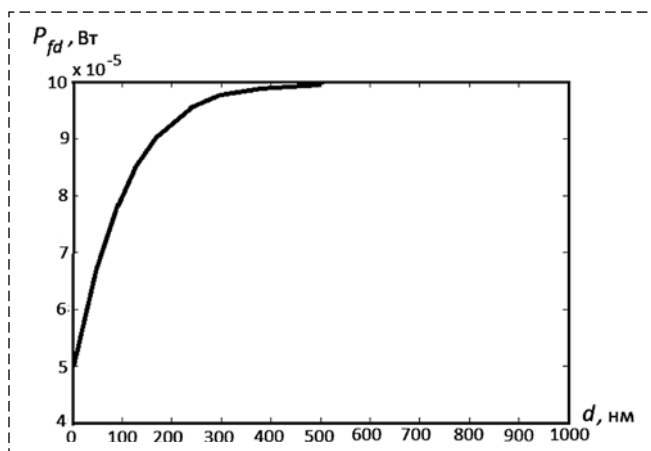


Рис. 3. Типовая зависимость отражательной способности P_{fd} от зазора d

жательной способности P_{fd} от зазора d . Подобную зависимость можно аппроксимировать с помощью следующей функции:

$$P_{fd,m} = (a - b \exp(-d/c)) \cdot 10^{-5},$$

где параметры a , b , c можно оценить по экспериментальным данным, например, с помощью метода наименьших квадратов [6].

В частности, для конкретной зависимости, приведенной на рис. 3, были получены следующие оценки:

$$a = 10, b = 5, c = 120.$$

Выбор базовых элементов системы стабилизации профилометра

Основным требованием при выборе фотоприемника является соответствие его спектральной чувствительности спектральной характеристике излучателя. Для преобразователя приближения зазора на основе ОТЭ целесообразно использовать кремниевые фотодиоды, имеющие линейную зависимость фототока от мощности падающего излучения, высокую термостабильность и малый нижний предел минимально детектируемой мощности [7]. Связь между изображением по Лапласу переменной U_d и изображением переменной d может быть записана в следующем виде:

$$U_d(s) = W_{iu}(s)W_{fd}(s)d(s),$$

где $U_d(s)$, $d(s)$ — изображения по Лапласу от переменных U_d , d ; s — комплексная переменная;

$W_{iu}(s) = \frac{k_{iu}}{T_{iu}s + 1}$ — передаточная функция преобразователя тока, измеряемого в амперах (А), фотоприемника к выходу преобразователя напряжения,

измеряемого в вольтах (В); K_{iu} — коэффициент усиления; T_{iu} — постоянная времени преобразователя;
 $W_{fd}(s) = \frac{k_{fd}}{T_{fd}s + 1}$ — передаточная функция фотоприемника, преобразующего входной поток излучения (Вт) в ток (А); k_{fd} — коэффициент усиления; T_{fd} — постоянная времени фотоприемника, причем коэффициент k_{fd} зависит от типа фотоприемника, от интенсивности $P_{ии}$ и типа светового излучателя.

Было проведено исследование динамических характеристик различных схем построения преобразователя на основе применения ряда известных фотоприемников и операционных усилителей. Для исследуемой установки был выбран фотодиод ФД324 с чувствительностью $S_{fd} = 0,4$ А/Вт, темновым током $I_t = 0,005$ мкА и постоянной времени $T_{fd} = 10$ нс [7], а для схемы преобразователя "ток—напряжение" на основе экспериментального анализа — быстродействующий операционный усилитель ОУ-154УД4.

На рис. 4 показаны переходные процессы в блоке преобразования энергии излучения в напряжение для различных типов операционных усилителей: 1 — ОУ-SL2541В, 2 — ОУ-154УД4 и 3 — ОУ-140УД6 [8, 9].

Из анализа данных переходных процессов видно, что:

- для усилителя ОУ-SL2541В характерно наличие значительных осцилляций выходного сигнала;
- для усилителя ОУ-154УД4 выходной сигнал имеет более ослабленные осцилляции;
- для усилителя ОУ-140УД6, наблюдается небольшое увеличение инерционности канала прямого преобразования при полном отсутствии осцилляций выходного сигнала.

В качестве исполнительного органа был выбран пьезоэлектрический двигатель на основе

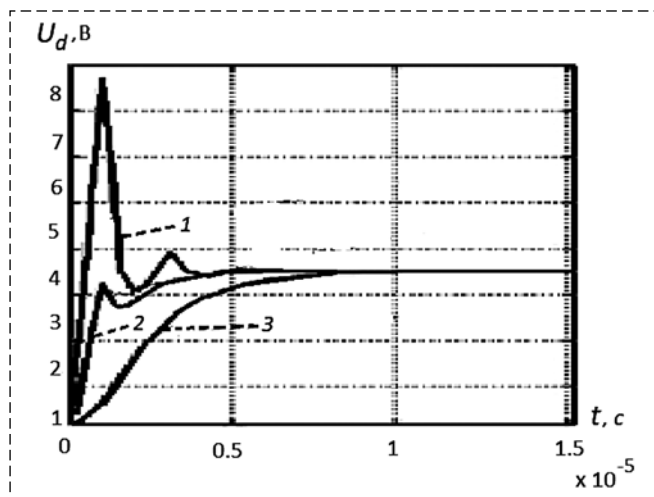


Рис. 4. Переходные процессы в блоке преобразования энергии излучения в напряжение

обратного пьезоэлектрического эффекта [10]. Выбранная модель пьездвигателя обеспечивает максимальную скорость 10 мм/с, максимальное толкающее усилие $F_{pd} = 20$ Н и максимальное удерживающее усилие $N_{pd} = 22$ Н [11].

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

$$W_{pd}(s) = \frac{k_{pd}}{(T_{pd}s + 1)s}.$$

В качестве датчика перемещения применяли компактную бесконтактную инкрементальную энкодерную систему, обеспечивающую работу со скоростью до 10 м/с и с разрешением до 1 нм как для линейных, так и для поворотных систем (система Tonic компании Renishaw) [12]. Передаточная функция датчика положения сенсора может быть записана в виде

$$W_{dp}(s) = \frac{k_{dp}}{T_{dp}s + 1}.$$

Математическое моделирование системы стабилизации профилометра без корректирующего звена

На рис. 5 показана структурная схема системы стабилизации с передаточными функциями отдельных звеньев.

Численные значения параметров звеньев исследуемой системы стабилизации приведены в таблице.

$k_{fd},$ Вт/А	$k_{iu},$ А/В	$k_y,$ В/В	$k_{pd},$ Нм/В	$T_{fd},$ с ⁻¹	$T_{iu},$ с ⁻¹	$T_y,$ с ⁻¹	$T_{pd},$ с ⁻¹
0,4	$10 \cdot 10^4$	10	$4,42 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}$	$9,9 \cdot 10^{-5}$

Анализ приведенной схемы системы показывает, что она имеет статический нелинейный

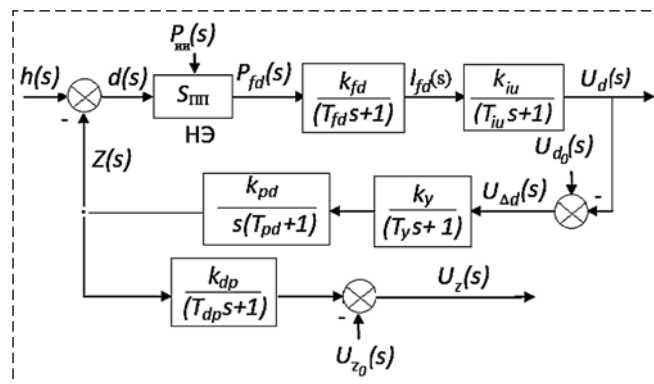


Рис. 5. Структурная схема системы стабилизации зазора для профилометра на основе ОТЭ

элемент и динамическую линейную часть, которая описывается передаточной функцией

$$W_{лч}(s) = \frac{k_{fd}k_{iu}k_yk_{pd}}{(T_{fd}s + 1)(T_{iu}s + 1)(T_y s + 1)s(T_{pd}s + 1)}.$$

Уравнения состояния нелинейной системы стабилизации можно записать в матричной форме:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, d_0, h_0) \quad (1)$$

или в скалярной форме:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\frac{x_1}{T_{fd}} + \frac{k_{fd}}{T_{fd}} P_{fd}(x_5, h); \\ \dot{x}_2 &= -\frac{x_2}{T_{i_u}} + \frac{k_{iu}}{T_{i_u}} x_1; \\ \dot{x}_3 &= -\frac{x_3}{T_y} + \frac{k_y}{T_y} (x_2 - U_d(d_0)); \\ \dot{x}_4 &= -\frac{x_4}{T_{pd}} + \frac{k_{pd}}{T_{pd}} x_3; \\ \dot{x}_5 &= x_4; \\ \dot{x}_6 &= -\frac{x_6}{T_{dp}} + \frac{k_{dp}}{T_{dp}} x_5, \end{aligned}$$

где d_0 — расстояние между сенсором и рельефом поверхности исследуемого тела в заданный момент времени; h_0 — подъем или спуск рельефа поверхности тела в заданный момент времени; $x_1 = x_1(t)$ — выход фотоприемника; $x_2 = x_2(t)$ — выход преобразователя ток—напряжение; $x_3 = x_3(t)$ — выход усилительного корректирующего звена; $x_4 = x_4(t)$ — скорость перемещения сенсора пьезодвигателем; $x_5 = x_5(t)$ — перемещение сенсора пьезодвигателем по оси OZ (с точностью до знака); $x_6 = x_6(t)$ — выход датчика перемещения;

$$\begin{aligned} P_{fd}(x_5, h) &= \left(a - b \exp\left(\frac{x_5 + h_0}{c}\right) \right) \cdot 10^{-5}; \\ U_d(d_0) &= k_{fd}k_{iu} \left(a - b \exp\left(\frac{-d_0}{c}\right) \right) \cdot 10^{-5}. \end{aligned}$$

Следует отметить сложности интегрирования нелинейной системы уравнений (1). Данная система является, по сути, сингулярной, так как динамика отдельных ее звеньев описывается процессами с постоянными времени порядка $10^{-5} \dots 10^{-6}$ с, а динамика замкнутого контура имеет постоянную времени $10^{-4} \dots 10^{-2}$ с в зависимости от заданных величин d_0 и h_0 [13]. Поэтому в качестве основного средства интегрирования (решателя) при моделировании системы использовались методы, предназначенные для исследования "жестких" дифференциальных уравнений и имеющиеся в распоряжении пользователей среды MATLAB (функции ode15s и ode23s) [14].

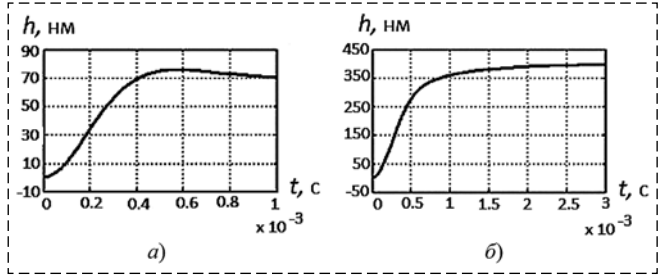


Рис. 6. Результаты моделирования нескорректированной нелинейной системы стабилизации:

а) $d_0 = 50$ нм, $h_0 = 20$ нм; б) $d_0 = 250$ нм, $h_0 = 150$ нм

Результаты моделирования работы системы стабилизации для различных значений d_0 и h_0 в среде Simulink/MATLAB при заданных параметрах модели, указанных в таблице, приведены на рис. 6.

Несложно заметить, что нелинейная система стабилизации является астатической, хотя пере-регулирование переходных процессов изменяется от 0...30 %, а время затухания переходных процессов $(0,8 \dots 5) \cdot 10^{-3}$ с при изменении значений $d_0 \in (10 \dots 350)$ нм.

Решение задачи построения корректирующего устройства

Построим класс линеаризованных моделей в диапазоне изменения задающего воздействия $d_0 \in (0 \dots 500)$ нм и возмущающего воздействия $h_0 \in (0 \dots 300)$ нм. Для построения линеаризованной модели при известном задающем воздействии d_0 и возмущении h_0 необходимо вычислить решение уравнений, определяющих положение точки равновесия и соответствующие данной точке равновесия матрицы Якоби линеаризованной системы. Положение равновесия x_{st} системы уравнений (1) определяется с помощью решения алгебраического уравнения:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}_{st}, d_0, h_0) = 0.$$

Компоненты единственного решения равны:

$$\begin{aligned} x_{st,2} &= U_d(d_0), x_{st,1} = x_{st,2}/k_{iu}, x_{st,3} = 0, x_{st,4} = 0, \\ x_{st,5} &= \ln((a - x_{st,1} \cdot 10^5/k_{fd})/b) - h_0, x_{st,6} = x_{st,5}/k_{dp}. \end{aligned}$$

Тогда уравнения линеаризованной системы уравнений можно записать в общем виде:

$$\begin{aligned} \delta \dot{\mathbf{x}} &= \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{x}, d, h)}{\partial \mathbf{x}} \bigg|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_{st} \\ d=d_0 \\ h=h_0}} \delta \mathbf{x} + \\ &+ \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{x}, d, h)}{\partial d} \bigg|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_{st} \\ d=d_0 \\ h=h_0}} \delta d + \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{x}, d, h)}{\partial h} \bigg|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_{st} \\ d=d_0 \\ h=h_0}} \delta h, \end{aligned}$$

где $\delta \mathbf{x} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_{st}$, $\delta d = d - d_0$, $\delta h = h - h_0$; x_{st} — вектор состояния нелинейной системы, соответствующий положению равновесия при d_0 и h_0 .

Для численного вычисления соответствующих матриц Якоби был использован известный алгоритм, который не входит в состав стандартных функций среды MATLAB [15].

Проведенные исследования показали, что в исследуемом диапазоне изменения задающего воздействия $d_0 \in (0...500)$ нм и возмущающего воздействия $h_0 \in (0...300)$ нм все линеаризованные модели являются устойчивыми.

Проведенные исследования для линеаризованной модели системы стабилизации показали, что откорректированную передаточную функцию усилителя целесообразно реализовывать в виде

$$W_y(s) = \frac{k_y(T_d s + 1)}{(T_y s + 1)},$$

где $k_y = 8$, $T_d = 0,001$.

На рис. 7 приведены нормированные переходные процессы замкнутой линеаризованной системы при разных значениях d_0 и h_0 .

Переходные процессы в замкнутой нелинейной системе стабилизации при использовании выбранного корректирующего звена показаны на рис. 8.

Таким образом, полученные результаты показывают, что включение корректирующего звена позволяет избежать значительного перерегулирования в замкнутой системе при малых значениях d_0 при незначительном увеличении длительности переходных процессов, а также уменьшить длительность переходных процессов при больших значениях d_0 и h_0 .

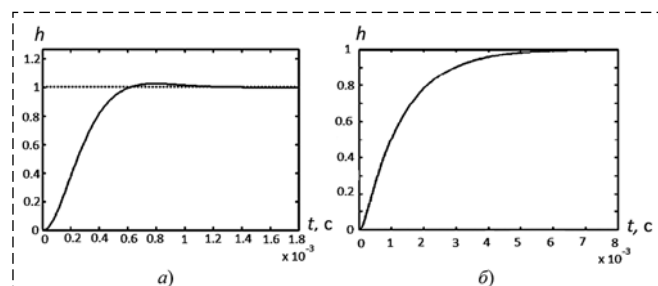


Рис. 7. Нормированные переходные процессы в линеаризованной системе стабилизации:

а) $d_0 = 50$ нм, $h_0 = 20$ нм; б) $d_0 = 250$ нм, $h_0 = 150$ нм

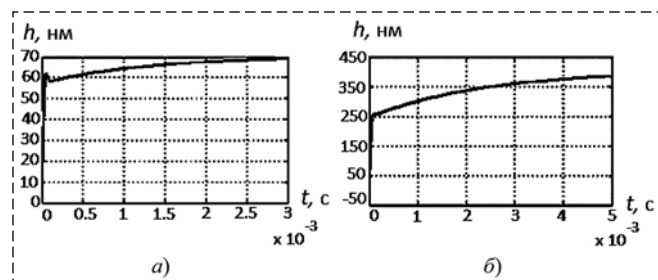


Рис. 8. Переходные процессы в нелинейной системе при включении в замкнутый контур управления корректирующего звена:

а) $d_0 = 50$ нм, $h_0 = 20$ нм; б) $d_0 = 250$ нм, $h_0 = 150$ нм

Полученные результаты исследования могут быть применены для проектирования нелинейных систем, содержащих в своем контуре несимметричные нелинейные статические элементы, в том числе для систем стабилизации оптических профилометров нанометрического диапазона на основе ОТЭ. В статье показано, что использование откорректированной замкнутой системы стабилизации с надлежащим выбором ее элементарной базы дает возможность на основе стандартных правил формирования структуры и параметров робастного регулятора для многорежимных линеаризованных моделей формировать замкнутую нелинейную систему, позволяющую получать информацию о высоте неровностей поверхности, без повышенного риска ударов оптического датчика об исследуемое тело.

Список литературы

1. Рыжович А. А., Солоневич С. В., Хило Н. А., Лепарский В. Е. Лазерный профилометр для определения качества поверхности // Матер. 9-й Междунар. конф. "Взаимодействие излучений с твердым телом", 20–22 сентября Минск, 2011 г. С. 448–450.
2. Nano-Optics and Near-Field Optical Microscopy / Ed. by Zayats A., Richards D. Boston: Artech House, 2009. 379 p.
3. Shubeita G. T., Sekatskii S. K., Riedo B., Dietler G. Scanning Near-Field Optical Microscopy based on the Heterodyne Phase-Controlled Oscillator Method // Journal of Applied Physics. 2000. Vol. 88, N. 5. P. 2921–2927.
4. Handbook of Nano-Optics and Nanophotonics. M. Springer, 2013. 1068 p.
5. Бусурин В. И., Лю Чжэ, Ахламов П. С., Бердюгин Н. А. Исследование бесконтактного оптического преобразователя приближения мехатронной системы стабилизации зазора сканирующего профилометра // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16. № 1. С. 43–47.
6. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математическо-статистической теории обработки наблюдений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 1958. 338 с.
7. Шуберт Ф. Светодиоды. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 496 с.
8. Операционный усилитель ОУ-SL2541B. URL: http://www.datasheetlib.com/datasheet/1270687/sl2541b_plessey-semiconductors.html (дата обращения 28.01.2017).
9. Операционный усилитель ОУ-154УД4, ОУ-140УД6. URL: <http://www.chipinfo.ru>, (дата обращения 28.01.2017).
10. Бобцов А. А., Бойков В. И., Быстров С. В., Григорьев В. В. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2011. 134 с.
11. Пьезодвигатель "Piezolegs". URL: <http://www.piezomotor.com>, (дата обращения 28.01.2017).
12. Бесконтактная инкрементальная энкодерная система "Tonic". URL: <http://www.renishaw.ru> (дата обращения 28.01.2017).
13. Геращенко Е. И., Геращенко С. М. Метод разделения движений и оптимизация нелинейных систем. М.: Наука, 1975. 296 с.
14. Черных И. В. Simulink: среда создания инженерных приложений / Под ред. В. Г. Потемкина М.: Диалог-МИФИ, 2004. 496 с.
15. D'Errico J. Numerical Differentiation: Function Jacobianest. URL: <http://www.mathworks.com> (дата обращения 28.01.2017).

Investigation of the Sensor Stabilization System for Non-Contact Scanning Profilometer Based on the Optical Tunneling Method

V. I. Busurin, Doctor of Engineering Science., professor, vbusurin@mai.ru✉,
P. S. Kudryavtsev, Technical sciences, associate professor, mpso121@mail.ru
Liu Zhe, Trainee, lzg599312@hotmail.com
Moscow Aviation Institute (National Research University)
Volokolamskoe shosse, d. 4, g. Moskva, A-80, GSP-3, 125993

Corresponding author: **Busurin Vladimir I.**, D. Sc.,
Moscow Aviation Institute (National Research University),
Moscow, 125993, Russian Federation,
e-mail: vbusurin@mai.ru

Accepted on

Non-contact profilometer often use scanning method to obtain data about the shape of the surface of the body. In this paper, present investigation and modeling of stabilization gap for non-contact optical profilometer based on the optical tunneling effect (OTE) in the dynamic mode based on the characteristics of its constituent blocks. In operation of such a scanning optical profilometer transducer moves along the test surface, without touching it. To ensure a correct reading of the measurement results is necessary to maintain the gap between the optical module and the test approach permanent body with high accuracy. For this proposed use of tracking feedback system that provides the stabilization of nanometer gap. This allows you to receive signals, depending on the topography of the surface, and on this basis to build a height map. The system of non-contact profilometer stabilization gap comprises a converter approach based OTE, photodetector, the convertor "current — voltage", the height of the surface of the sensor and a piezomotor. In the process of stabilizing the converter system converts approximations gap d changes in the optical radiation P_{fd} , and formed a feedback voltage $U_{os, d}$. According to the difference of voltage $U_{os, d}$ and master voltage U_{d0} , increments are obtained voltage DU_d , which provides piezomotor control applied to traffic proximity transducer that provides stabilization of the gap d at a given initial level d_0 . System of this problems solve the task of selection circuitry, which managed to implement the necessary requirements for the quality of regulation and the task of building a regulator, by compensating unwanted temporal properties of the contour measurement, which is based on dynamic links with large gains and small time constants.

Keywords: Optical tunneling, stabilization, conversion function, profilometer, dynamic system

For citation:

Busurin V. I., Kudryavtsev P. S., Liu Zhe. Investigation of the Sensor Stabilization System for Non-Contact Scanning Profilometer Based on the Optical Tunneling Method, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 2, pp. 80—85.

DOI: 10.17587/mau.19.80-85

References

1. Ryzhevich A. A., Solonevich S. V., Hilo N. A., Leparskiy V. E. *Lazernyy profilometr dlya opredeleniya kachestva poverhnosti* (Laser profilometer for determination of surface quality), 9th International Conference "Interaction of Radiations with a Solid", September 20—22 Minsk, 2011, pp. 448—450 (in Russian).
2. Zayats A., Richards D. ed. *Nano-Optics and Near-Field Optical Microscopy*, Boston: Artech House, 2009, 379 p.
3. Shubeita G. T., Sekatskii S. K., Riedo B., Dietler G. Scanning Near-Field Optical Microscopy based on the Heterodyne Phase-Controlled Oscillator Method, *Journal of Applied Physics*, 2000, vol. 88, no. 5, pp. 2921—2927.
4. Ohtsu M. ed. *Handbook of Nano-Optics and Nanophotonics*, Springer, 2013, 1068 p.
5. Busurin V. I., Liu Zhe, Akhlamov P. S., Berdyugin N. A. *Issledovanie beskontaktnogo opticheskogo preobrazovatelya priblizheniya mekhatonnoj sistemy stabilizatsii zazopa skaniruyushchego profilometra* (Investigation of the contactless optical converter of the approximation of the mechatronic system for the stabilization of the clearance of the scanning profilometer), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 1, pp. 43—47 (in Russian).
6. Linnik Yu. V. *Metod naimen'shikh kvadratov i osnovy matematicheskoy statisticheskoy teorii obrabotki nablyudenij* (The method

of least squares and the foundations of the mathematical-statistical theory of processing observations), Moscow, FIZMATLIT, 1958, 338 p. (in Russian).

7. Schubert F. *Svetodiody* (Light-emitting diodes), Moscow, FIZMATLIT, 2008. 496 p. (in Russian).

8. **Operational** amplifier OY-SL2541B (Operacionnyy usilitel' OU-SL2541B), available at: http://www.datasheetlib.com/datasheet/1270687/sl2541b_plessey-semiconductors.html (date of access January 28, 2017).

9. **Operational** amplifier OY-154UD4, OY-140UD6 (Operacionnyy usilitel' OU-154UD4, OU-140UD6), available at: <http://www.chipinfo.ru>, (date of access 01/28/2017).

10. Bobtsov A. A., Boykov V. I., Bystrov S. V., Grigoryev V. V. *Ispolnitel'nye ustrojstva i sistemy dlya mikroperemeshchenij* (Implementing devices and systems for micro spaces), S. Peterburg, SPB GU ITMO, 2011, 134 p. (in Russian).

11. *P'ezodvigatel' "Piezolegs"* (Piezo motor "Piezolegs"), available at: <http://www.piezomotor.com> (date of access January 28, 2017).

12. *Beskontaktnaya inkremental'naya ehkodernaya sistema "Tonic"* (Non-contact incremental encoder system "Tonic"), available at: <http://www.renishaw.ru> (date of access on 01/28/2017).

13. Gerashchenko E. I., Gerashchenko S. M. *Metod razdeleniya dvizhenij i optimizatsiya nelineynykh sistem* (The method of separation of motions and optimization of nonlinear systems), Moscow, Nauka, 1975, 296 p.

14. Chernykh I. V. *Simulink: sreda sozdaniya inzhenernykh prilozhenij* (Simulink: the environment for creating engineering applications), Moscow, Dialog-MIFI, 2004, 496 p. (in Russian).

15. D'Errico J. Numerical Differentiation: Function Jacobianest, available at: <http://www.mathworks.com> (date of access January 28, 2017).

В. И. Фрейман, канд. техн. наук, проф., vfrey@mail.ru,

А. А. Южаков, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, uz@at.pstu.ru,

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Диагностирование и оценка состояния элементов систем управления распределенными инфраструктурами

Предложены обобщенная и детализированная диагностические модели элементов систем управления, выполнено их математическое описание с помощью методов теории графов. Показан подход к разработке алгоритмов оценки состояния элементов систем управления, приведены результаты их практической реализации. Предложена методика расчета и анализа эксплуатационно-технических показателей элементов систем управления, основанная на методах теории надежности, приведен пример использования методики.

Ключевые слова: системы управления, эксплуатационно-технические показатели, надежность, модель, граф, диагностирование, восстановление

Введение

В современных экономических и политических условиях промышленность РФ все активнее переходит к разработке и выпуску отечественной импортозамещающей продукции, особенно высокотехнологичной аппаратуры различной функциональности и назначения. Наиболее эффективным и обоснованным становится ее применение в качестве элементов и устройств *систем управления* технологическими объектами, относящимися к "критической инфраструктуре": энергетике, транспорту, добыче и переработке сырья, коммуникациям, национальной безопасности и др. [1].

Для обеспечения профильной деятельности технологических систем различного назначения строится *распределенная инфраструктура* (РИС), компоненты и подсистемы которой решают задачи автоматизации технологических процессов, организации взаимодействия с использованием информационных и телекоммуникационных технологий, управления предприятием и т.п. Поэтому для выполнения требований к качественным и эксплуатационным показателям технологических систем, их объектов и процессов необходимы проектировать и производить высоконадежные компоненты, элементы и устройства систем управления [2], а также применять эффективные способы и средства обеспечения надежности их функционирования при эксплуатации [3].

Для обеспечения заданных эксплуатационно-технических показателей РИС необходимо повышать эффективность диагностирования технического состояния элементов систем управления (СУ). Работы в данном направлении проводятся отечественными учеными (в частности, в области функционального диагностирования [4], повышения отказоустойчивости [5], разработки диагностических моделей и их описания [6] и т.д.) и зарубежными исследователями (например, в об-

ласти проектирования систем с заданными показателями надежности [7], построения распределенных систем управления [8], применения современных "полевых" технологий управления [9] и др.). При этом сохраняется актуальность задач построения адекватных диагностических моделей с учетом специфики объекта контроля — элемента системы управления, а также выбора математического аппарата для ее описания. Это позволяет разработать и реализовать в автоматизированной системе диагностирования методы и алгоритмы оценки технического состояния элементов систем управления.

Анализ элементов систем управления как объектов диагностирования

Выделим два класса РИС, которые оказывают наиболее существенное влияние на широкий спектр показателей технологических систем: *системы автоматизации и управления* (САУ) и *инфокоммуникационные системы* (ИКС). Для САУ профильными задачами являются автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, для ИКС — предоставление и управление качеством информационных и телекоммуникационных услуг. Для управления указанными классами РИС используются соответствующие СУ — для САУ это *информационно-управляющие системы* (ИУС), для ИКС — *системы управления и мониторинга* (СУМ) [10].

Оба указанных класса систем управления могут быть описаны обобщенными компонентной (на уровне элементов, табл. 1) и информационной (на уровне протоколов взаимодействия, табл. 2) моделями.

Адекватность моделей СУ позволяет выделить общие признаки и принять общую модель СУ РИС, которая приведена на рис. 1.

Таблица 1

Модель на уровне компонентов СУ

№	Информационно-управляющие системы САУ	№	Системы управления и мониторинга ИКС
1	Датчики, измерительные преобразователи, исполнительные механизмы	1	Терминальное оборудование, модули, платы канальных окончаний
2	Контроллеры, промышленные компьютеры	2	Устройства контроля и сигнализации в составе коммуникационной аппаратуры, устройства связи с объектом
3	Диспетчерские пульты, щиты, программное обеспечение оператора (SCADA)	3	Менеджер системы управления и мониторинга производителя
4	Системы управления базами данных, удаленный доступ (Web)	4	Менеджер мультивendorной интегрированной системы управления и мониторинга

В системе управления (рис. 1) информация об объектах автоматизации передается от первичных информационных преобразователей (ПИПр) через программируемые локальные контроллеры (ПЛК) и аппаратуру передачи данных (АПД) в программное обеспечение верхнего уровня (SCADA). Информация от объектов связи и передачи данных (КС) по локальной сети управления и мониторинга

Таблица 2

Модель на уровне протоколов СУ

ИУС		СУМ	
1—2	Fieldbus (LON, CAN, Profibus, Modbus, Industrial Ethernet)	1—2	Сервисные каналы управления (встроенные или выделенные)
2—3	ЛВС (Ethernet, HDLC, TCP/IP)	2—3	Протоколы и интерфейсы СУ (Ethernet, HDLC, TCP/IP, SNMP, CMIP)
3—4	Интернет, СУБД, удаленный доступ к ресурсам	3—4	Интернет, СУБД, удаленный доступ к ресурсам

(ЛСУиМ), затем через служебный сервисный канал (ССК) транспортной сети управления и мониторинга (ТСУиМ), формируемый модулем внешних стыков (ВС) цифрового потока, в программное обеспечение менеджера системы управления и мониторинга (ПО СУМ). Информация может быть передана через базу данных (БД) и глобальную (Интернет) или локальную (Интранет) сети удаленным администраторам или операторам. Система диагностирования может быть реализована в виде отдельной подсистемы или интегрирована с ПО СУМ.

В работе решается задача построения диагностических моделей, алгоритмов и методов оценки состояния элементов систем управления 2-го уровня компонентной модели как основных

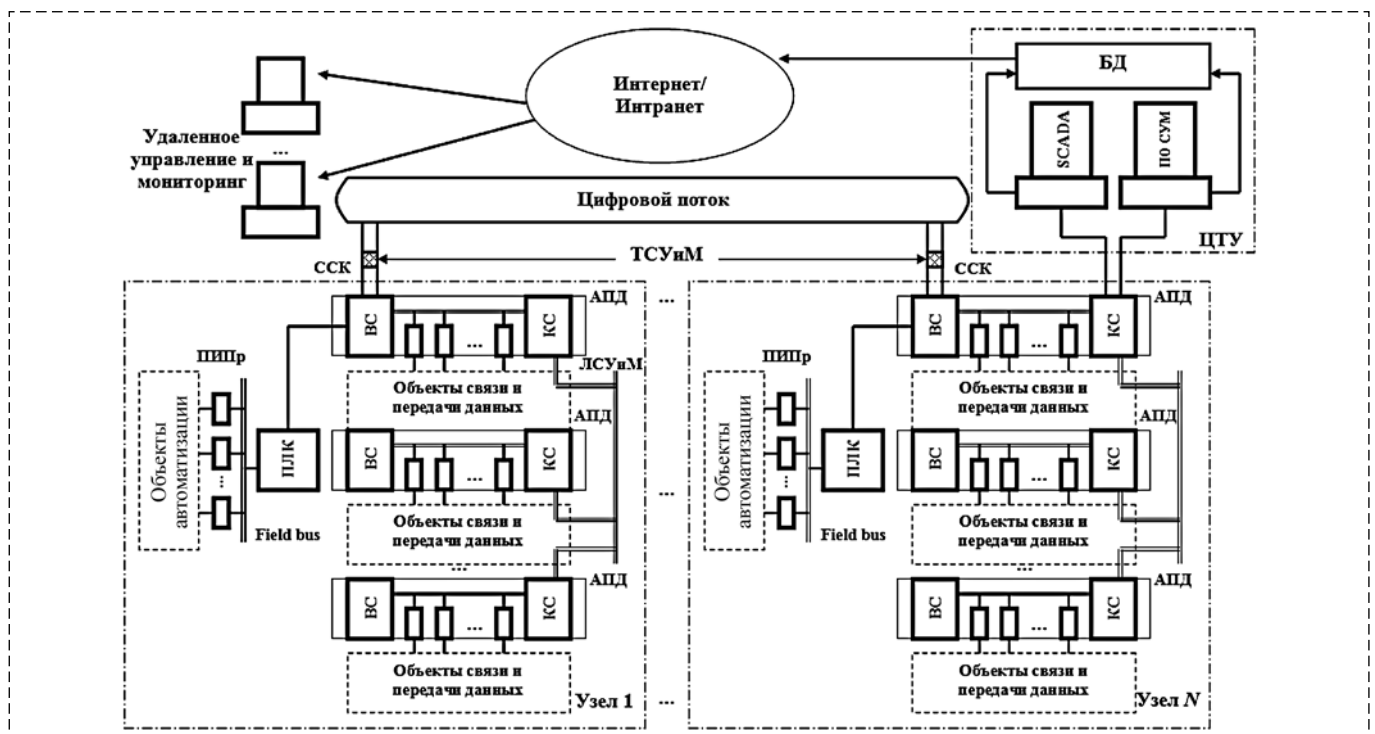


Рис. 1. Модель системы управления распределенной инфраструктурой

элементов с точки зрения распространенности и участия в процессах сбора, передачи и распределения информации.

**Диагностические модели
элементов систем управления**

Для эффективной реализации процедур контроля необходимо построить адекватную диагностическую модель выбранного объекта контроля [11]. Для решения разных задач проверки работоспособности предлагается строить *обобщенную* или *детализированную* диагностические модели. *Обобщенная диагностическая модель* проверки работоспособности позволяет получить *агрегированную* информацию об объекте и его компонентах и их техническом состоянии в целом. Для этого выделяются следующие варианты *статуса* объекта:

- *исправное*: объект доступен для контроля, нет сообщений о неисправностях его компонентов;
- *авария*: показывает несоответствие параметра заданным пороговым значениям ("коэффициент ошибок больше 10^{-3} "), неисправность элемента ("не отвечает микроконтроллер") и т.п.;
- *состояние*: возможно возникновение аварии ("увеличился ток накачки лазера") или информационное сообщение ("поднята трубка микротелефона");
- *нет связи*: объект недоступен для контроля, нарушен интерфейс взаимодействия между объектом и менеджером системы управления.

Предлагается следующая иерархическая структура компонентов диагностической модели:

- *модуль* (элементарная структура, неделимый объект контроля: физическое устройство (процессор, контроллер, узел, порт и т.п.) или виртуальная структура (поток, канал, стык и т.п.));
- *плата* (совокупность модулей, тоже может быть неделимым объектом контроля);
- *блок* (функциональное устройство, состоит из плат);
- *узел* (сосредоточенная структура, содержит несколько блоков, объединенных в локальную сеть);
- *подсеть* (распределенная структура, содержит несколько узлов);
- *сеть* (распределенная инфраструктура).

Указанным выше статусом может обладать объект каждого уровня иерархии. Методы и алгоритмы определения статуса объектов будут предложены ниже.

Детализированная диагностическая модель проверки работоспособности позволяет определить причину возникновения того или иного статуса объекта по *сообщениям о неисправностях*, формируемым объектами нижележащего уровня иерархии. Такие сообщения обычно привязаны к

неделимым объектам контроля (модулям (потокам, стыкам) или платам). Например, для *цифрового потока* данных выделяют следующие виды сообщений о неисправностях: LOS (потеря сигнала); LOF (потеря цикловой синхронизации); LOM (потеря сверхцикловой синхронизации); AIS (сигнал индикации аварийного состояния); RDI (индикация аварии на удаленном конце — извещение) и т.п. Отметим, что каждое сообщение о неисправности может быть классифицировано как авария или состояние в зависимости от сущности, значимости, последствий и т.д. В качестве иллюстрации к сообщениям о неисправности по *плате* можно указать следующие примеры: ошибка конфигурации; включение шлейфа; предавария лазера; работа от аккумуляторов; переход на резервный источник синхросигнала; вызов по служебной связи и т.п. При анализе объектов более высокого уровня иерархии представляется, например в виде отчета, детализированная информация по составляющим их неделимым объектам контроля.

Каждый физический объект (плата или блок) описывается структурой, в которой отражается техническая информация о нем. По запросу от менеджера или по собственной инициативе объект формирует информацию о своем техническом статусе (будем использовать этот термин вместо термина "техническое состояние"), например, в таком формате:

Начало	Адрес	Поле управления	Сообщение 1	Сообщение 2	...	Сообщение N	Конец
--------	-------	-----------------	-------------	-------------	-----	-------------	-------

Структура сообщения (на примере блока):

№ платы	Тип платы	Тип сообщения	Код сообщения
---------	-----------	---------------	---------------

Информация может быть использована:

- для индикации на самом блоке (например, в плате (статус компонентов платы или самой платы) или в специальном модуле контроля и сигнализации (статус блока));
- для индикации в специальном устройстве (транспаранте);
- для передачи, обработки и представления в менеджере СУ.

**Математическое описание диагностических
моделей на основе методов теории графов**

Для математического описания диагностической модели проверки работоспособности предпочтительно использование двоичной логики. Это объясняется тем, что обрабатывается элементарное событие — наличие или отсутствие конкретного сообщения о неисправности или конкретного статуса блока. При этом в соответствии

с принятой иерархией после установления статуса объектов i -го уровня начинается процесс обработки и принятия решения по статусу объектов $(i + 1)$ -го уровня.

Для определения и индикации технического статуса объектов на уровне *физических элементов и устройств* (модуль, плата и блок) выделяются следующие возможные варианты (размерность обобщенной диагностической модели равна 3, что подчеркивает ее компактность, но при этом низкую иллюстративность):

- И: исправен — нет аварий и состояний (ни по одному компоненту нет сообщений об авариях или состояниях);
- А: авария (у хотя бы одного из компонентов фиксируется хотя бы одна авария);
- С: состояние (у хотя бы одного из компонентов фиксируется хотя бы одно состояние, но ни одной аварии нет).

Для обработки, отображения, хранения и представления информации в *менеджере* список технических состояний расширяется за счет того, что полученные, просмотренные и проанализированные оператором сообщения могут быть *квитированы* (отложены, учтены), чтобы на их фоне можно было определить новые сообщения (размерность *детализированной диагностической модели* равна 9), и включает следующие варианты:

- нет информации;
- нет ответа;
- квитированный (отложенный) статус "нет ответа";
- нет аварий и состояний;
- состояние (есть новое или новые состояния);
- квитированный (отложенный) статус "состояние" (все состояния просмотрены и квитированы);
- авария (есть новое или новые аварии);
- квитированный (отложенный) статус "авария" (все аварии просмотрены и квитированы);
- новое состояние на фоне отложенных аварий.

Переходы между разными вариантами технического статуса могут быть описаны с помощью методов *теории графов*. Для иллюстрации общего подхода построим *нагруженный ориентированный граф переходов* (рис. 2) работы элемента системы управления (платы контроля и сигнализации) в составе коммуникационного оборудования (блока).

В соответствии с предложенной *обобщенной диагностической моделью* определяется технический статус объекта данного диагностирования на основании данных о контролируемых объектах (модулях и платах данного блока) и отображается, например, на встроенных средствах визуальной индикации.

Для процесса обработки информации в менеджере системы управления граф переходов усложняется за счет расширения списка возможных

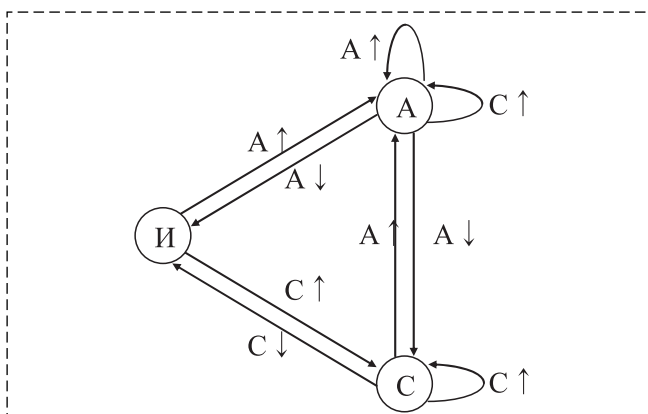


Рис. 2. Граф переходов процесса определения статуса блока (↑ — появление аварии или состояния; ↓ — устранение аварии или состояния)

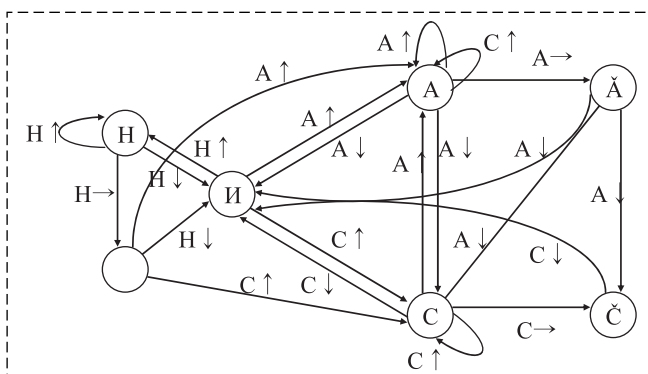


Рис. 3. Граф переходов процесса определения статуса блока аппаратуры передачи данных (↑ — появление аварии или состояния; ↓ — устранение аварии или состояния; → — квитирование аварии или состояния)

состояний, связанных с *квитированием* информации, *отсутствием связи* с объектом и т.п. Пример фрагмента такого графа приведен на рис. 3.

Построенные графы используются для разработки и реализации алгоритмов принятия решения по каждому уровню иерархической структуры диагностической модели.

Алгоритм определения состояния элемента системы управления

На основании анализа графов переходов для процессов определения технического статуса объектов всех уровней иерархии разработаны и реализованы алгоритмы принятия решения в соответствующих функциях программного обеспечения менеджера системы управления. Были построены и реализованы *алгоритмы* определения статуса платы, блока, узла, подсети и всей сети в целом. Для этого был использован *расширенный* список технических состояний (с учетом квитирования). Приведем в качестве иллюстрации алгоритм определения статуса платы контроля и сигнализации (рис. 4).

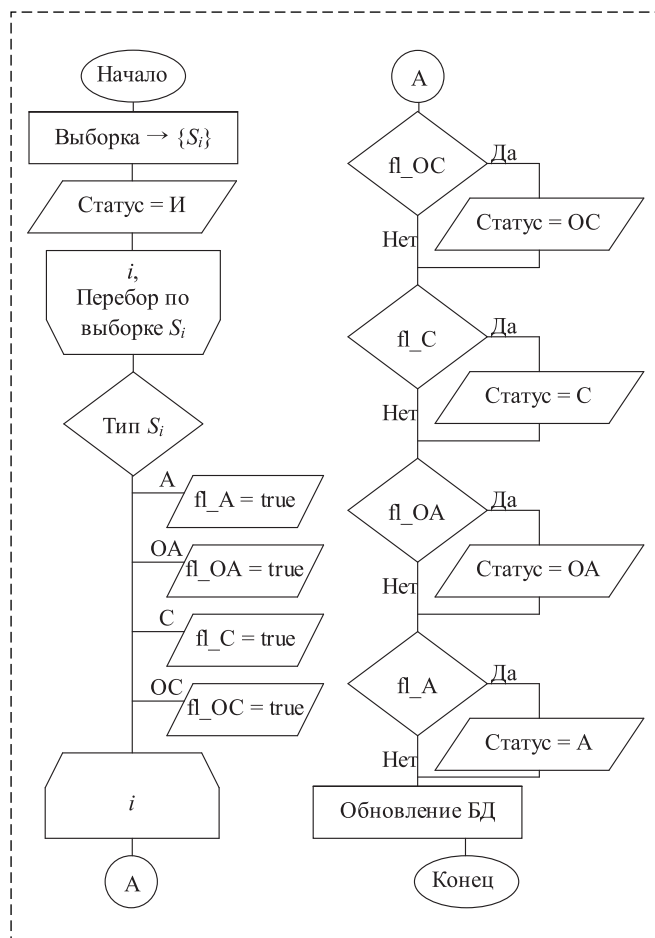


Рис. 4. Схема алгоритма принятия решения о статусе устройства (платы КС)

Таблица 3

Таблица формирования условий

№	Значения флагов статуса				Статус платы
	fl_A	fl_OA	fl_C	fl_OC	
1	0	0	0	0	И
2	1	—	—	—	А
3	0	1	0	—	ОА
4	0	1	1	—	ОАС
5	0	0	1	—	С
6	0	0	0	1	ОС

Для реализации алгоритма была построена таблица формирования условий (табл. 3) в зависимости от статуса флагов (fl) появления того или иного сообщения. Условные обозначения: "1" — истина (true); "0" — ложь (false); "—" — не имеет значения.

Для вышележащих уровней иерархии алгоритмы и таблицы принятия решения строятся аналогично, с учетом того, что число состояний расширяется за счет добавления событий "нет связи" и его квитирования.

Для повышения иллюстративности в программном обеспечении менеджера (карта сети) используется *графическая интерпретация* разных статусов. Приведем пример для разработанного программного обеспечения менеджера ИУС КПО-01 (рис. 5, см. вторую сторону обложки) распределенной информационно-технической инфраструктуры, построенной на промышленной коммуникационной аппаратуре производства ПАО "Морион" (г. Пермь) [12].

На рис. 5, а (см. вторую сторону обложки) показана карта сети с безаварийным состоянием всех узлов. На рис. 5, б по каждому узлу имеются сообщения о неисправностях, детализированные на следующих рисунках: рис. 5, в — состояние; рис. 5, г — квитированная авария; рис. 5, д — срочная авария; рис. 5, е — отсутствие связи с элементом.

Методика расчета основных эксплуатационно-технических показателей систем управления

Адекватные диагностические модели, эффективные алгоритмы тестового диагностирования, методы дешифрации и способы количественной оценки результатов контроля позволяют улучшить *основные эксплуатационно-технические показатели* элементов систем управления. Для рассматриваемого класса информационно-технических систем это коэффициенты *готовности, технического использования и простоя*, характеризующие вероятности нахождения элемента или всей системы в работоспособном (без учета времени технического обслуживания и восстановления), работоспособном (с учетом времени технического обслуживания и восстановления) и неработоспособном состояниях соответственно.

Для построения методики оценки влияния показателей системы диагностирования на эксплуатационно-технические показатели системы управления и ее элементов предлагается использовать "классический" подход теории надежности [1, 2, 11], но адаптировать его для выбранного класса объектов диагностирования — элементов систем управления. Основные этапы методики:

1. Определяются и описываются n состояний объекта диагностирования S_i (элемента, подсистемы, системы управления).

2. Строится диагностическая модель (например, в виде марковской цепи), задаются характеристики переходов q_{ij} .

3. Строится система дифференциальных уравнений вида для расчета финальных вероятностей нахождения объекта в каждом из состояний $P_j^*(t)$:

$$P_j^*(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t) q_{ij}, j \in [1; n]. \quad (1)$$

4. Принимается гипотеза, что марковский процесс является стационарным, и финальные вероятности считаются постоянными. Поэтому строится система алгебраических уравнений, которая разрешается относительно P_j .

5. Определяются основные эксплуатационно-технические показатели, такие как коэффициент готовности K_r , коэффициент технического использования $K_{ти}$, коэффициент простоя $K_{п}$ и др.

Проиллюстрируем предлагаемую методику на примере анализа СУ.

1. Выделим и опишем следующие состояния объекта диагностирования:

S_1 — объект находится в рабочем режиме;

S_2 — объект находится в предусмотренном регламентом режиме диагностирования (технического обслуживания);

S_3 — объект неработоспособен (неисправен, неправильно функционирует) и находится в рабочем режиме;

S_4 — объект находится в режиме восстановления (поиск неисправностей, ремонт, замена, проверка качества проведенных работ и т.п.).

2. Для построения графа переходов марковского процесса (рис. 6) введем обозначения состояний S_i и характеристики переходов q_{ij} :

$S_1 - P$; $S_2 - Д$; $S_3 - Н$; $S_4 - В$;

λ — переходы в неработоспособное состояние (из рабочего состояния S_1 $q_{13} = \lambda_{и}$; из состояния диагностирования S_2 $q_{23} = \lambda_{д}$);

μ — переходы в рабочее состояние (из состояния диагностирования S_2 $q_{21} = \mu_{д}$; из состояния восстановления S_4 $q_{41} = \mu_{в}$);

γ — переходы в состояние диагностирования или восстановления (из рабочего состояния S_1 $q_{12} = \gamma_{и}$; из неработоспособного состояния S_3 $q_{34} = \gamma_{н}$).

3, 4. Строим систему уравнений с учетом стационарности процесса:

$$\mu_{д}P_{д} + \mu_{в}P_{в} - (\lambda_{и} + \gamma_{и})P_{р} = 0;$$

$$\gamma_{и}P_{р} - \mu_{д}P_{д} = 0;$$

$$\lambda_{и}P_{р} + \lambda_{д}P_{д} - \gamma_{н}P_{н} = 0;$$

$$\gamma_{н}P_{н} - \mu_{в}P_{в} = 0;$$

$$P_{р} + P_{д} + P_{н} + P_{в} = 1$$

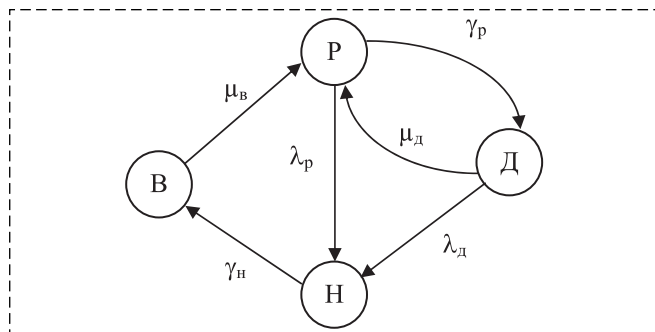


Рис. 6. Граф переходов

($P_{р}$, $P_{д}$, $P_{н}$, $P_{в}$ — вероятности нахождения в режимах работоспособности, диагностирования, неисправности, восстановления соответственно).

Решаем систему уравнений:

$$P_{д} = (\gamma_{и}P_{р})/\mu_{д};$$

$$P_{н} = (\lambda_{и}P_{р})/\gamma_{н};$$

$$P_{в} = (\lambda_{и}P_{р})/\mu_{в};$$

$$\begin{aligned} P_{р} + P_{д} + P_{н} + P_{в} &= \\ = P_{р} + (\gamma_{и}P_{р})/\mu_{д} + (\lambda_{и}P_{р})/\gamma_{н} + (\lambda_{и}P_{р})/\mu_{в} &= \\ = P_{р}(1 + \gamma_{и}/\mu_{д} + \lambda_{и}/\gamma_{н} + \lambda_{и}/\mu_{в}) &= 1. \end{aligned}$$

Отсюда определим выражение для вероятности $P_{р}$, а через нее — и для всех остальных:

$$\begin{aligned} P_{р} &= 1/(1 + \gamma_{и}/\mu_{д} + \lambda_{и}/\gamma_{н} + \lambda_{и}/\mu_{в}) = \\ &= (\mu_{д}\gamma_{н}\mu_{в})/(\mu_{д}\gamma_{н}\mu_{в} + \gamma_{и}\gamma_{н}\mu_{в} + \mu_{д}\lambda_{и}\mu_{в} + \mu_{д}\gamma_{и}\lambda_{и}) = \\ &= (\mu_{д}\gamma_{н}\mu_{в})/(\gamma_{н}\mu_{в}(\mu_{д} + \gamma_{и}) + \mu_{д}\lambda_{и}(\mu_{в} + \gamma_{н})); \end{aligned}$$

$$P_{д} = (\gamma_{и}\gamma_{н}\mu_{в})/(\gamma_{н}\mu_{в}(\mu_{д} + \gamma_{и}) + \mu_{д}\lambda_{и}(\mu_{в} + \gamma_{н}));$$

$$P_{н} = (\lambda_{и}\mu_{д}\mu_{в})/(\gamma_{н}\mu_{в}(\mu_{д} + \gamma_{и}) + \mu_{д}\lambda_{и}(\mu_{в} + \gamma_{н}));$$

$$P_{в} = (\lambda_{и}\mu_{д}\gamma_{н})/(\gamma_{н}\mu_{в}(\mu_{д} + \gamma_{и}) + \mu_{д}\lambda_{и}(\mu_{в} + \gamma_{н})).$$

Интенсивности переходов определяются как обратные величины к усредненным временным характеристикам процесса:

$\lambda_{и} = 1/T_{о}$, где $T_{о}$ — наработка на отказ объекта в рабочем режиме;

$\lambda_{д} = 1/T_{п}$, где $T_{п}$ — время проверки объекта и выявления дефектов в режиме диагностирования;

$\mu_{д} = 1/T_{р}$, где $T_{р}$ — время перевода объекта в рабочий режим из режима диагностирования;

$\mu_{в} = 1/T_{в}$, где $T_{в}$ — время восстановления объекта;

$\gamma_{и} = 1/T_{д}$, где $T_{д}$ — период проведения регламентных работ с объектом;

$\gamma_{н} = 1/T_{н}$, где $T_{н}$ — время перевода объекта в режим восстановления из режима неисправного состояния.

5. Определим основные эксплуатационно-технические показатели:

$$\begin{aligned} K_{г} &= P_{р} + P_{д}; \quad K_{ти} = P_{р}; \\ K_{п} &= 1 - K_{г} = 1 - (P_{р} + P_{д}) = P_{н} + P_{в}. \end{aligned}$$

С учетом полученных соотношений можно на разных этапах (проектирование, эксплуатация, прогнозирование, сравнительный анализ и т.п.) оценить влияние одного или нескольких показателей системы диагностирования на основные эксплуатационно-технические показатели элементов системы управления. Для этого разрабатывается и проходит апробацию программный инструментарий.

Оценка влияния показателей процедур диагностирования на эксплуатационно-технические показатели элементов систем управления

Как было показано выше, основные эксплуатационно-технические показатели элементов систем управления определяются показателями безотказности и восстанавливаемости.

Основным показателем *безотказности* является наработка на отказ — для элемента эта характеристика задается производителем и указывается в паспорте (технических условиях). Для всей системы показатели безотказности определяются на основе анализа ее структуры (расчет по эквивалентной схеме [2] замещения или графу марковской цепи [2]). Повысить их значения можно путем выбора более надежного оборудования или путем резервирования.

Показатели *восстановления* характеризуются средним временем восстановления объекта, которое зависит от нескольких факторов (поиск и определение характера неисправности, возможность ремонта или замены, время доступа к объекту, проверка качества восстановительных работ и т.п.). Выделим основные этапы процесса восстановления после неисправности.

1. Подготовка и реализация тестов поиска (тестовое диагностирование).
2. Организация дополнительных измерений.
3. Анализ результатов диагностирования (лог-файлов, отчетов и т.п.).
4. Принятие решения (определение места и характера неисправности).
5. Выполнение корректирующих действий (доступ, ремонт, замена, реконфигурация, проверка качества восстановления).

В процедуре восстановления основные задачи выполняет *система диагностирования* (отдельно реализованная либо интегрированная с системой управления и мониторинга), которая позволяет оперативно выявить неисправности, пока не приводившие к отказу, например, за счет углубленного тестирования или прогнозирования. Среднее время, эффективность и точность диагностирования также являются значимыми параметрами для повышения надежности систем управления. Как правило, указанные задачи решаются во время проведения регламентных работ по проверке правильности функционирования, для чего должна быть построена и реализована адекватная диагностическая модель. Выделим основные этапы диагностирования.

1. Подготовка и реализация тестов проверки правильности функционирования (тестирование).
2. Сбор и промежуточное хранение результатов тестирования.
3. Обработка, дешифрация и оценка результатов тестирования.

4. Принятие решения о показателях функционирования элементов СУ.

Средства и инструменты, которые необходимы для проведения процедур диагностирования: специалист-диагност, система управления и мониторинга, система диагностирования, измерительная техника, экспертная система (указанные функции могут быть совмещены аппаратно или программно).

Пример реализации методики оценки влияния показателей диагностирования системы на ее эксплуатационно-технические показатели

В заключение приведем пример расчета и оценки влияния показателей диагностирования

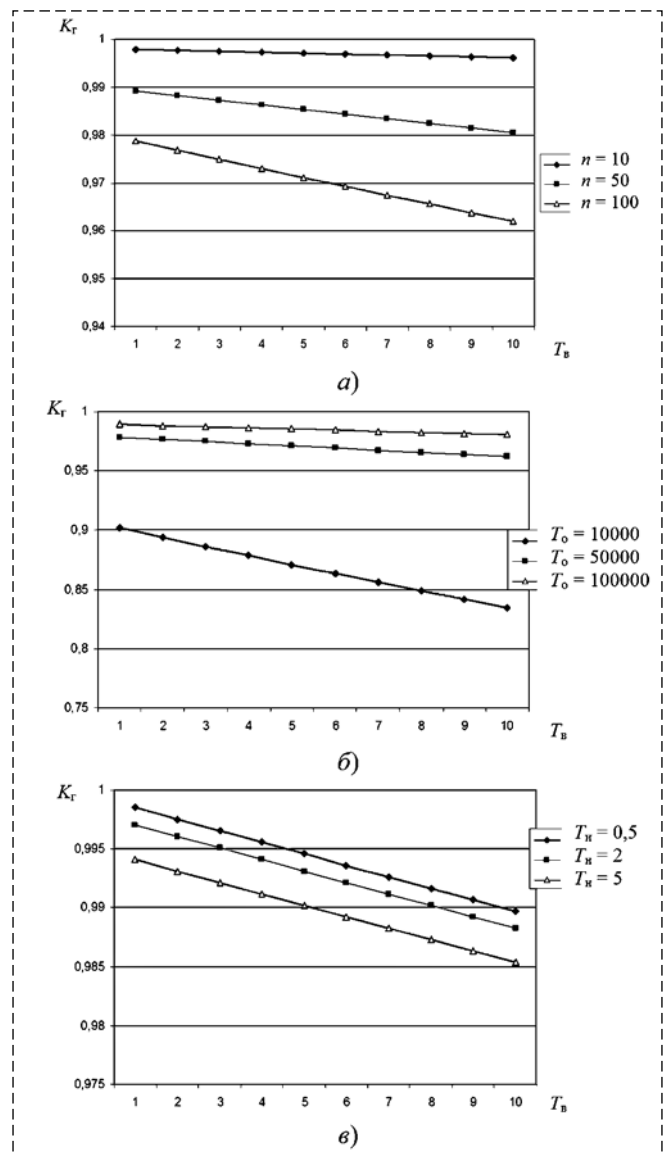


Рис. 7. Оценка влияния среднего времени восстановления на значение K_r при разных характеристиках системы управления: а — числе элементов; б — средней наработке на отказ; в — среднем времени поиска неисправности

на основные эксплуатационно-технические показатели элементов системы управления: $K_r = f(T_B)|_{n=\text{const}}$ (рис. 7, а); $K_r = f(T_B)|_{T_0=\text{const}}$ (рис. 7, б); $K_r = f(T_B)|_{T_H=\text{const}}$ (рис. 7, в).

Из анализа рис. 7 можно сделать вывод, что влияние показателей диагностирования для разных параметров имеет разный характер: при увеличении числа сетевых элементов n (рис. 7, а) и ухудшении наработки на отказ T_0 (рис. 7, б) оно усиливается (увеличивается производная, характеризующаяся углом наклона прямой), а для среднего времени поиска неисправности T_H — остается практически неизменным (рис. 7, в).

Предложенная методика и инструментарий моделирования позволяют проводить синтез и анализ систем управления распределенными инфраструктурами, варьируя показатели надежности элементов и структуры в целях достижения заданных (требуемых) значений основных эксплуатационно-технических показателей.

Заключение

В работе представлены результаты решения следующих задач диагностирования и оценки состояния элементов систем управления распределенными инфраструктурами.

1. Показана актуальность проблемы обеспечения эксплуатационно-технических элементов систем управления. Проведен краткий обзор публикаций отечественных и зарубежных исследователей в рассматриваемой предметной области. Выделены направления, в которых продолжают исследования, результаты которых приведены в работе.

2. Построены и исследованы обобщенная и детализированная диагностические модели для проверки работоспособности элементов систем управления, в рамках которых реализовано иерархическое представление структуры объекта диагностирования на уровне компонентов разных уровней. Разработана математическая модель в виде ориентированных графов переходов между техническими состояниями для объектов разных уровней диагностических моделей. На основе графов спроектированы и реализованы в программном обеспечении системы управления промышленной коммуникационной аппаратурой алгоритмы обработки и представления диагностической информации, приведена их графическая иллюстрация.

3. Предложена методика расчета основных эксплуатационно-технических показателей элементов систем управления. Показано, как на значения основных показателей оказывают влияние показатели методов и процедур диагностирования. Проанализировано влияние пока-

зателей разных процедур диагностирования на эксплуатационно-технические характеристики элементов систем управления распределенными инфраструктурами, даны рекомендации по их практическому применению.

Список литературы

1. Кон Е. Л., Кулагина М. М. Надежность и диагностика компонентов инфокоммуникационных и информационно-управляющих систем. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. 310 с.
2. Тюрин С. Ф. Надежность систем автоматизации. Пермь: Изд-во Перм. национ. исслед. политехн. ун-та, 2012. 191 с.
3. Твердохлебов В. А. Задачи контроля и диагностирования в управлении функционированием крупномасштабных систем // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2016: Материалы Девятой международной конференции: в 2-х томах. Под общей редакцией С. Н. Васильева, А. Д. Цвиркуна. 2016. С. 245—247.
4. Гришин В. Ю., Лобанов А. В., Сиренко В. Г. Функциональное диагностирование в распределенном системном диагностировании многомашинных вычислительных систем // Автоматика и телемеханика. 2002. № 1. С. 154—160.
5. Каравай М. Ф., Пархоменко П. П., Подлазов В. С. Универсальная сетевая структура для отказоустойчивых многопроцессорных систем реального времени // Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения: материалы конференции с международным участием. ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН. 2010. С. 583—597.
6. Верещака В. А., Густомясов А. Н., Зимин В. В. Диагностические модели технических систем // Инженерный вестник. 2015. № 3. 5 с.
7. Aminifar A., Eles P., Peng Z., Cervin A. Control-quality driven design of cyber-physical systems with robustness guarantees // In Design, Automation and Test in Europe (DATE). 2013.
8. Lian F.-L., Moyne J., Tilbury D. Network design consideration for distributed control systems // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2010. Vol. 10, Iss. 2. P. 297—307.
9. Miśkiewicz M. Access delay in LonTalk MAC protocol // Computer Standards & Interfaces. Nederland: Elsevier Science Publishing Company, 2009. P. 548—556.
10. Гаврилов А. В., Кон Е. Л., Фрейман В. И. Системы управления телекоммуникационных систем информационно-вычислительных сетей. Стандарты, модели, протоколы: учеб. пособие для вузов. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2005. 101 с.
11. Гуменюк В. М. Надежность и диагностика электротехнических систем. Владивосток: Изд-во Дальневост. гос. техн. ун-та, 2010. 218 с.
12. Фрейман В. И. Применение методов автоматизации при построении программно-аппаратных лабораторных стендов по изучению элементов и устройств промышленных информационно-управляющих и телекоммуникационных систем // Дистанционное и виртуальное обучение. 2017. № 4. С. 102—109.

Diagnosis and Assessment of Elements Condition of Control Systems for Distributed Infrastructures

V. I. Freyman, vfrey@mail.ru✉, A. A. Yuzhakov, uz@at.pstu.ru,
Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614990, Russian Federation

Corresponding author: Freyman Vladimir I., Ph. D., Professor,
Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614990, Russian Federation,
e-mail: vfrey@mail.ru

Accepted on November 10, 2017

The article is devoted to the task of condition analysis of control systems for distributed infrastructures based on technical diagnostics and reliability theory procedures and methods. The urgency of the problems to be solved is substantiated, a brief review of scientific publications in this field is carried out, and directions that require further research are analyzed. The concept of "distributed infrastructure", integrating the automation, control, communication and data transmission subsystems within the technological systems is introduced. The model of distributed infrastructure control system is designed, the main processes of its functioning are described. The analysis of elements models of control systems for distributed infrastructure at the component level and interconnection protocols is executed. The diagnostic object is selected, its properties and characteristics are analyzed. A generalized and detailed diagnostic models of the control systems elements are proposed, their mathematical description using the methods of graph theory is performed. An approach to the development of algorithms for estimating the condition of control systems elements is shown, an example is given, and the results of their practical implementation are shown. The method for calculating and analyzing operational and technical parameters of control systems elements based on methods of reliability theory is proposed. The influence of indicators of diagnosis and checking different stages on the operational and technical parameters of the control systems elements is estimated, an example of the use of the proposed method with using the software modeling tool is given. Conclusions on the results of this paper are made, recommendations on their practical application are offered.

Keywords: control systems, operational and technical indicators, reliability, model, graph, diagnosis, recovery

For citation:

Freyman V. I., Yuzhakov A. A. Diagnosis and Assessment of Elements Condition of Control Systems for Distributed Infrastructures, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 2, pp. 86—94.

DOI: 10.17587/mau.19.86-94

References

1. Kon E. L., Kulagina M. M. *Nadezhnost' i diagnostika komponentov infokommunikatsionnykh i informatsionno-upravljajushchikh sistem* (The reliability and diagnostics of infocommunication and information and control systems components), Perm, Publishing house of Perm. nac. issled. politehn. un-ta, 2011, 310 p. (in Russian).
2. Tjurin S. F. *Nadezhnost' sistem avtomatizatsii* (The reliability of automation systems), Perm, Publishing house of Perm. nac. issled. politehn. un-ta, 2012, 191 p. (in Russian).
3. Tverdohlebov V. A. *Zadachi kontrolja i diagnostirovanija v upravlenii funkcionirovanijem krupnomasshtabnykh sistem* (The testing and diagnostics tasks for management of large-scale system functioning), *Upravlenie Razvitiem Krupnomasshtabnykh Sistem MLSD'*2016, 2016, pp. 245—247 (in Russian).
4. Grishin V. Ju., Lobanov A. V., Sirenko V. G. *Funkcional'noe diagnostirovanie v raspredelennom sistemnom diagnostirovanii mnogomashinnykh vychislitel'nykh sistem* (A distributed functional diagnostic system for multi-computer systems), *Avtomatika i Telemekhanika*, 2002, no. 1, pp. 154—160 (in Russian).
5. Karavaj M. F., Parhomenko P. P., Podlazarov V. S. *Universal'naja setevaja struktura dlja otkazoustojchivyykh mnogoprocennoykh sistem real'nogo vremeni* (An universal network structure for fault-tolerant real-time microprocessor systems), *Tekhnicheskie i Programmnye Sredstva Sistem Upravlenija, Kontrolja i Izmerenija*, 2010, pp. 583—597 (in Russian).
6. Vereshhaka V. A., Gustomjasov A. N., Zimin V. V. *Diagnosticheskie modeli tekhnicheskikh sistem* (Diagnostic models of technical systems), *Inzhenernyj Vestnik*, 2015, no. 3, 5 p. (in Russian).
7. Aminifar A., Eles P., Peng Z., Cervin A. Control-quality driven design of cyber-physical systems with robustness guarantees, *Design, Automation and Test in Europe (DATE)*, 2013, 6 p.
8. Lian F.-L., Moyne J., Tilbury D. Network design consideration for distributed control systems, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2010, vol. 10, iss. 2, pp. 297—307.
9. Miśkiewicz M. Access delay in LonTalk MAC protocol, *Computer Standards & Interfaces*, Nederland, Elsevier Science Publishing Company, 2009, pp. 548—556.
10. Gavrilov A. V., Kon E. L., Frejman V. I. *Sistemy upravlenija tele-kommunikatsionnykh sistem informatsionno-vychislitel'nykh setej. Standarty, modeli, protokoly* (The control systems of telecommunication systems of networks. Standards, models, protocol), Perm, Publishing house of Perm. gos. tehn. un-ta, 2005, 101 p. (in Russian).
11. Gumenjuk V. M. *Nadezhnost' i diagnostika elektrotekhnicheskikh sistem* (The reliability and diagnostics of the electrotechnical systems), Vladivostok Publishing house of Dal'nevost. gos. tehn. un-ta, 2010, 218 p. (in Russian).
12. Frejman V. I. *Primenenie metodov avtomatizatsii pri postroenii programmno-apparatnykh laboratornykh stendov po izucheniju jelementov i ustrojstv pro-myshlennykh informatsionno-upravljajushchikh i telekommunikatsionnykh sistem* (The application of automation methods for designing the hardware-software laboratory stands for studying the elements and devices of industrial information and control systems and telecommunication networks), *Distantsionnoe i Virtual'noe Obuchenie*, 2017, no. 4 (118), pp. 102—109 (in Russian).

В. Ф. Филаретов^{1, 3}, д-р техн. наук, проф., зав. лаб., filaretov@inbox.ru,
А. Ю. Коноплин^{2, 3}, канд. техн. наук, зав. лаб., konoplin@marine.febras.ru,
Н. Ю. Коноплин^{2, 3}, мл. науч. сотр., konoplin.nikita@gmail.com,

¹Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток,

²Институт проблем морских технологий ДВО РАН, Владивосток,

³Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

Метод супервизорного управления манипулятором подводного робота¹

Рассмотрен новый метод супервизорного выполнения манипуляционных операций многозвенными манипуляторами, установленными на подводных роботах. Этот метод предполагает построение математических моделей объектов работ с помощью бортовых гидроакустических сонаров, формирование целевых точек и сложных пространственных траекторий рабочих органов манипуляторов с помощью управляемой оператором телекамеры, изменяющей пространственную ориентацию своей оптической оси.

Ключевые слова: супервизорное управление, подводный робот, многозвенный манипулятор, облако точек, математическая модель, глубоководные исследования, пространственная траектория, подводные операции, система управления

Введение

Анализ современных тенденций в области проектирования и эксплуатации подводных роботов (ПР), оснащаемых многозвенными подводными манипуляторами (ПМ), указывает на расширение функциональных возможностей этих роботов за счет создания высококачественных систем и устройств навигации [1], а также методов распознавания окружающей обстановки и планирования траекторий движения как ПР, так и закрепленных на них ПМ [2, 3]. При этом подавляющее большинство подводных технологических и исследовательских манипуляционных операций до сих пор выполняется в ручном режиме специально обученными операторами ПР, которые, основываясь на своем опыте и знаниях, планируют траектории движения рабочих инструментов. Однако, не имея прямого контакта с объектом работ и судя о его расположении только по видеоизображению, оператору очень сложно быстро и точно решать поставленные задачи. Это приводит к снижению производительности его работы и росту вероятности ошибок.

В частности, обозначенная проблема была подтверждена в глубоководных научно-исследовательских экспедициях в Японском, Беринговом и Охотском морях при работе с ПР Sub-

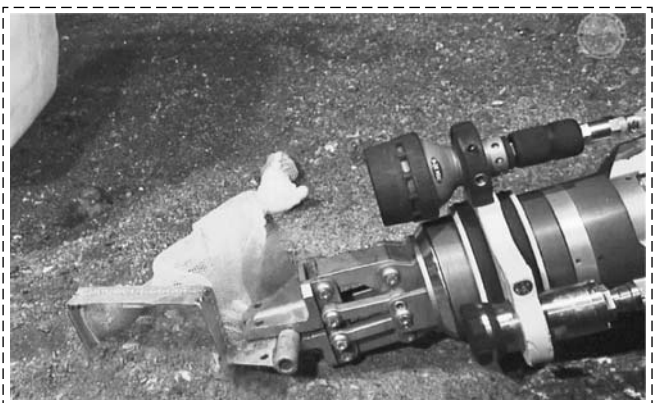


Рис. 1. Выполнение манипуляционной операции с помощью ПМ Schilling Orion 7P

Atlantic Comanche 18, оснащенным ПМ Schilling Orion 7P. Взятие проб грунта, геологических пород и бактериальных матов (рис. 1) приводило к быстрой утомляемости операторов, к значительному увеличению времени выполнения операций, к ошибкам в работе и даже к повреждению рабочих инструментов.

Для решения этой возникшей проблемы в статье предложен и рассмотрен новый метод супервизорного выполнения манипуляционных операций с помощью ПМ, установленного на ПР.

1. Описание метода супервизорного управления ПМ, установленным на ПР

Предложенный метод вначале предполагает определение геометрической формы и местоположения объектов работ с помощью бортовых ги-

¹ Разработка и программная реализация метода супервизорного выполнения манипуляционных операций выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-79-10064). Теоретические и экспериментальные работы по построению математических моделей донной поверхности выполнены за счет грантов РФФИ (проекты 16-29-04195 Офи_м, 17-57-45055 Инд_а).

дроакустических сонаров. Затем оператор наводит на объект работ установленную на ПР телекамеру, которая может изменять пространственную ориентацию своей оптической оси, и задает одну или несколько рабочих точек, принадлежащих этому объекту. По координатам заданных точек, лежащих на поверхности объекта работ, автоматически формируется пространственная траектория движения и ориентация рабочего инструмента ПМ в зависимости от поставленной манипуляционной задачи.

На рис. 2 на примере взятия поверхностного слоя грунта показана реализация супервизорного управления грунтоотборным боксом, который перемещается ПМ 1, установленным на ПР 2. С помощью многолучевого гидроакустического сонара 3 в реальном масштабе времени формируется облако точек, с помощью которого строится математическая модель донной поверхности 4, используемая для дальнейшего формирования траектории движения рабочего инструмента ПМ. В частности, для отбора грунта в местах скопления бактериальных матов оператор, перемещая оптическую ось 5 телекамеры, задает s целевых точек A_i ($i = 1, s$), которые являются точками пересечения этой оси с поверхностью дна. По заданным целевым точкам формируется траектория 6 движения рабочего инструмента ПМ 2. При взятии поверхностного слоя грунта вектор a грунтоотборного бокса при движении ПМ по траектории (см. рис. 2) всегда должен быть перпендикулярен к поверхности дна, а вектор n нормали к a должен быть направлен к следующей целевой точке A_{i+1} .

Во многих случаях поверхность дна, не имеющая существенных неровностей, может быть представлена в виде усредненной плоскости [4]. В прямоугольной системе координат (СК) хуз, жестко связанной с корпусом ПР, указанную плоскость можно описать уравнением в нормальном виде [5]:

$$ax + by + cz = d, \quad (1)$$

где x , y и z — оси связанной СК, начало которой O расположено в центре величины (водоизмещения) ПР, ось x совпадает с горизонтальной продольной осью ПР, ось z — с его вертикальной осью, а ось y составляет с ними правую тройку; a , b и c — направляющие косинусы единичного

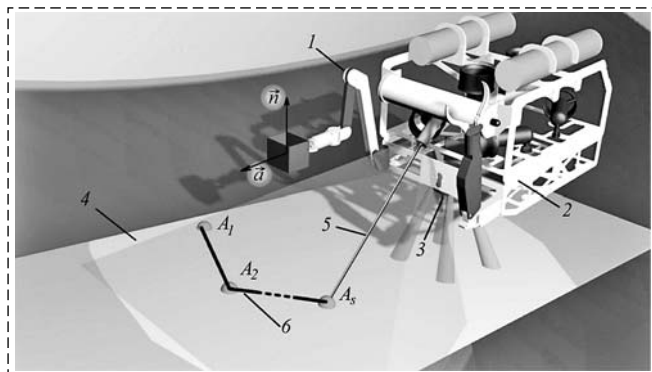


Рис. 2. Выполнение операции в супервизорном режиме

вектора $m = [a, b, c]$ нормали к плоскости (1), который совпадает с вектором a ; d — расстояние от начала СК хуз до этой плоскости. Элементы m и d рассчитываются с помощью сформированного облака точек, принадлежащих донной поверхности, по методу, изложенному в работе [6].

Для формирования траектории движения рабочего инструмента ПМ в СК хуз необходимо вычислить координаты целевых точек A_i (рис. 2). Если телекамера наведена на точку $A_i = [A_{ix}, A_{iy}, A_{iz}]$, то в СК хуз положение этой камеры определяется заранее заданной точкой $P_i = [P_{ix}, P_{iy}, P_{iz}]$, расположенной на оптической оси, а ее ориентация — единичным вектором $d_i = [d_{ix}, d_{iy}, d_{iz}]$. В этом случае оптическая ось телекамеры, совпадающая с вектором d_i , выходящим из точки P_i в направлении плоскости (1) дна, описывается выражением

$$A_i = P_i + t_i d_i, \quad (2)$$

где t_i — параметр, изменяющийся в пределах $[0, \infty)$. Значение параметра t_i в точке пересечения оси (2) с плоскостью (1) можно получить, подставив выражение (2) в уравнение (1) [7]:

$$a(P_{ix} + t_i d_{ix}) + b(P_{iy} + t_i d_{iy}) + c(P_{iz} + t_i d_{iz}) - d = 0;$$

$$t_i = \frac{-(aP_{ix} + bP_{iy} + cP_{iz} - d)}{ad_{ix} + bd_{iy} + cd_{iz}}. \quad (3)$$

Координаты точки A_i пересечения оптической оси телекамеры с плоскостью дна определяются подстановкой найденного значения параметра t_i в выражение (2)

$$A_i = P_i + \frac{-(aP_{ix} + bP_{iy} + cP_{iz} - d)}{ad_{ix} + bd_{iy} + cd_{iz}} d_i.$$

После наведения оператором оптической оси телекамеры на следующую целевую точку A_{i+1} значение параметра t_{i+1} вычисляется с помощью выражения (3) для новой точки P_{i+1} и вектора d_{i+1} . Аналогично определяются координаты остальных целевых точек, и в результате траектория движения рабочего инструмента ПМ представляется в виде его последовательного перехода по всем целевым точкам.

2. Построение траектории движения рабочего инструмента ПМ при сложном рельефе дна

Если поверхность дна имеет сложный рельеф, то необходимо использовать многолучевые гидроакустические 3D-сонары [8, 9], позволяющие с высокой точностью формировать облака точек, принадлежащих поверхности дна в зоне работ ПР. С помощью этих облаков и известных методов [10, 11] строится триангуляционная модель (рис. 3), представляющая собой множество треугольных пластин, сшитых между собой. На основе этой модели формируется траектория движения рабочего инструмента ПМ, которая прохо-

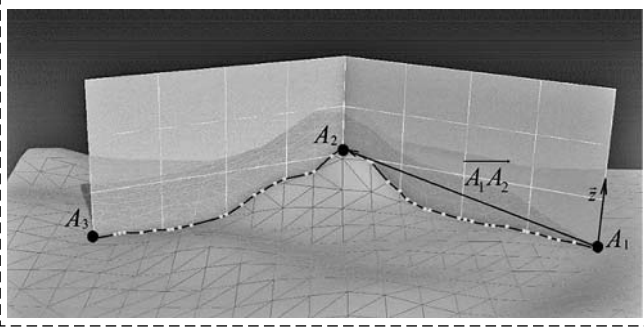


Рис. 3. Триангуляционная модель поверхности дна

дит через заданные оператором целевые точки A_i на сложном рельефе морского дна. Каждый k -й треугольник в триангуляции задается в СК хуэ координатами трех вершин $V_{k0}, V_{k1}, V_{k2} \in R^3$, где $k = 1, g$, g — число треугольников.

Для нахождения в этой СК координат каждой целевой точки A_i на пересечении оптической оси телекамеры и полученной триангуляционной поверхности вначале необходимо определить, какой из всех g треугольников в текущий момент времени пересекается осью (2). Для этого используется алгоритм Моллера—Трумбора [12], который на основе информации о координатах точки P_i , элементах вектора d_i , а также координатах вершин V_{k0}, V_{k1}, V_{k2} всех g треугольников позволяет определить k -й треугольник, через который проходит ось (2). При этом координаты точки A_i в указанной СК относительно вершин k -го треугольника в векторной форме могут быть определены в виде

$$A_{ik} = w_{ik}V_{k0} + u_{ik}V_{k1} + v_{ik}V_{k2}, \quad (4)$$

где u_{ik}, v_{ik}, w_{ik} — барицентрические координаты точки A_i относительно вершин k -го треугольника ($u_{ik} + v_{ik} + w_{ik} = 1$).

Выразив $w_{ik} = 1 - (u_{ik} + v_{ik})$ и подставив уравнение оси (2) в выражение (4), получим систему уравнений относительно параметров t_{ik}, u_{ik}, v_{ik} :

$$P_i + t_{ik}d_i = (1 - (u_{ik} + v_{ik}))V_{k0} + u_{ik}V_{k1} + v_{ik}V_{k2},$$

которая может быть записана в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} -d_i & V_{k1} - V_{k0} & V_{k2} - V_{k0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{ik} \\ u_{ik} \\ v_{ik} \end{bmatrix} = [P_i - V_{k0}]. \quad (5)$$

Значения параметров t_{ik}, u_{ik}, v_{ik} находятся путем решения системы уравнений (5) [12]:

$$\begin{bmatrix} t_{ik} \\ u_{ik} \\ v_{ik} \end{bmatrix} = \frac{1}{(d_i \times (V_{k2} - V_{k0})) \cdot (V_{k1} - V_{k0})} \times \begin{bmatrix} ((P_i - V_{k0}) \times (V_{k1} - V_{k0})) \cdot (V_{k2} - V_{k0}) \\ (d_i \times (V_{k2} - V_{k0})) \cdot (P_i - V_{k0}) \\ ((P_i - V_{k0}) \times (V_{k1} - V_{k0})) \cdot d_i \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где $(\cdot)$ — скалярное произведение векторов; $(\times)$ — векторное произведение векторов.

В результате треугольник k с вершинами V_{k0}, V_{k1} и V_{k2} , который пересекает ось (2), находится из условий [12]:

$$0 \leq u_{ik} \leq 1, \quad (7)$$

$$0 \leq v_{ik} \leq 1, \quad (8)$$

$$u_{ik} + v_{ik} \leq 1, \quad (9)$$

а координаты точки A_i пересечения оптической оси телекамеры с треугольником k определяются подстановкой найденного параметра t_{ik} из выражения (6) в уравнение (2):

$$A_i = P_i + \frac{((P_i - V_{k0}) \times (V_{k1} - V_{k0})) \cdot (V_{k2} - V_{k0})}{(d_i \times (V_{k2} - V_{k0})) \cdot (V_{k1} - V_{k0})} d_i.$$

Для последующего построения траектории движения рабочего инструмента ПМ, проходящей через все полученные точки A_i , эта траектория представляется в виде последовательности разрезов триангуляционной поверхности, которые являются вертикальными профилями частей этой поверхности между соседними целевыми точками. Указанные профили можно представить в виде множества точек пересечения ребер треугольников триангуляции и плоскости, образованной вектором $\overline{A_i A_{i+1}}$, соединяющим соседние целевые точки, и единичным вектором z , параллельным оси z СК хуэ (рис. 3).

Для построения траектории движения рабочего инструмента ПМ, проходящей через точки пересечения треугольников с плоскостью, образованной векторами $\overline{A_i A_{i+1}}$ и z , необходимо вычислить, какие из всех g треугольников пересекаются указанной плоскостью, и рассчитать координаты точек этих пересечений. При определении факта пересечения ребра треугольника k указанной плоскостью для каждой пары его вершин с помощью алгоритма [7] сравниваются знаки расстояний p_{ikh} от h -й вершины ($h = 0, 1, 2$) до плоскости, образованной векторами $\overline{A_i A_{i+1}}$ и z , а сами величины p_{ikh} вычисляются по формуле $p_{ikh} = r_i \cdot \overline{A_i V_{kh}}$, $r_i = \frac{\overline{A_i A_{i+1}} \times z}{\|\overline{A_i A_{i+1}} \times z\|}$, где $\overline{A_i V_{kh}}$ — вектор, соединяющий целевую точку A_i и h -ю вершину V_{kh} k -го треугольника.

Если для любой пары вершин треугольника k соответствующие им величины p_{ikh} имеют одинаковые знаки ($p_{ik0}p_{ik1} > 0$ и $p_{ik0}p_{ik2} > 0$ или $p_{ik0}p_{ik1} < 0$ и $p_{ik0}p_{ik2} < 0$), то плоскость не пересекает k -й треугольник. Если же p_{ikh} имеют разные знаки ($p_{ik0}p_{ik1} > 0$ и $p_{ik0}p_{ik2} < 0$ или $p_{ik0}p_{ik1} < 0$ и $p_{ik0}p_{ik2} > 0$), то на ребре треугольника k , образованном этой парой вершин, лежит точка T_{ike} , через которую должен пройти рабочий инструмент ПМ ($e = 1, 2$, поскольку в общем случае ребра каждого треугольника могут иметь не более двух точек пере-

сечения с плоскостью). Координаты точки T_{ike} для ребра, образованного вершинами V_{k0} и V_{k1} , определяются по формуле [7]

$$T_{ike} = V_{k0} + t_{ike} \frac{\overline{V_{k0}V_{k1}}}{\|\overline{V_{k0}V_{k1}}\|},$$

где $t_{ike} = \frac{-(r_i \cdot \overline{OV_{k0}} + |\overline{OA_i} \cdot r_i|)}{r_i \cdot \overline{V_{k0}V_{k1}}}$, $\overline{V_{k0}V_{k1}}$ — вектор, соединяющий вершины V_{k0} и V_{k1} треугольника k [7], $|\overline{OA_i} \cdot r_i|$ — расстояние от плоскости, образованной векторами $\overline{A_iA_{i+1}}$ и z , до начала O СК хуэ.

Координаты второй точки T_{ike} на одном из двух оставшихся ребер k -го треугольника, образованных вершинами V_{k0} и V_{k1} или V_{k1} и V_{k2} , вычисляются аналогично. Если же справедливо равенство $p_{ikh} = 0$, то h -я вершина k -го треугольника лежит на указанной плоскости. В этом случае $T_{ike} = V_{kh}$.

В результате формируется множество точек T_{ike} , через которые ПМ должен провести рабочий инструмент (в частности, грунтоотборный бокс). При этом в точках T_{ik1} и T_{ik2} , а также при перемещении между этими точками вектор a_{ik} всегда будет перпендикулярен плоскости k -го треугольника, которому принадлежат указанные точки. Поэтому в СК хуэ вектор a_{ik} всегда перпендикулярен плоскости, заданной тремя вершинами k -го треугольника.

Для построения траектории движения рабочего инструмента ПМ полученное множество точек T_{ike} с соответствующими им векторами a_{ik} сортируется в последовательность точек T_j с векторами a_j , расположенных между соседними целевыми точками A_i и A_{i+1} , где j — порядковый номер точки в последовательности перемещения рабочего инструмента ПМ. При этом вектор n_j указанного инструмента всегда параллелен вектору $\overline{T_jT_{j+1}}$, соединяющему пройденную и следующую точки множества. В результате полученная последовательность точек T_j и соответствующих им векторов a_j и n_j формирует траекторию движения рабочего инструмента, а также может задавать различные режимы этого движения [13].

3. Программная реализация и исследование метода супервизорного управления подводным манипулятором, установленным на подводном роботе

Разработанный метод супервизорного управления ПМ реализован на языке программирования C++. Входными данными для созданной программы является множество принадлежащих поверхности дна точек, получаемых с помощью гидроакустических сонаров и определяемых в трехмерном пространстве (рис. 4, а). Это множество загружается в программу в виде текстового файла. В эту же программу заносятся задаваемые

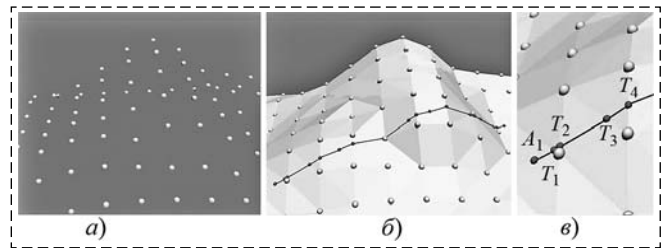


Рис. 4. Множество точек поверхности дна СК хуэ (а), триангуляционная модель дна и сформированная траектория движения рабочего инструмента ПР (б), детальное описание (представление) траектории (в)

оператором координаты точек P_i и векторов d_i , определяющих расположение оптической оси телекамеры в СК хуэ.

Разработанная программа строит триангуляционную модель донной поверхности (рис. 4, б), используя алгоритм [10], реализованный в программной библиотеке Point Cloud Library [11]. После задания оператором точек P_i и векторов d_i программа рассчитывает координаты целевых точек A_j , а также формирует последовательность точек T_j (рис. 4, б, 4, в) и соответствующих им векторов a_j и n_j рабочего инструмента ПМ. Визуализация результатов работы созданной программы выполнялась с использованием программного продукта 3ds Max и графического программного пакета ParaView.

Заключение

Разработанный метод может использоваться для выполнения в супервизорном режиме многих подводных манипуляционных операций. При этом траектории и ориентация в процессе движения рабочих инструментов ПМ формируются на основе математической модели объекта работ с учетом требований к выполнению конкретных технологических операций. Разработанный метод реализован в виде программы, позволяющей строить триангуляционные модели поверхности морского дна и рассчитывать пространственные траектории движения рабочих инструментов ПМ на основе целеуказаний, задаваемых оператором.

Список литературы

1. Dubrovin F. S., Scherbatyuk A. F. Development of Algorithms for an Autonomous Underwater Vehicle Navigation with a Single Mobile Beacon: The Results of Simulations and Marine Trials // Proc. of the XXIIth International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2015 / Saint Petersburg, Russia. P. 144—152.
2. Filaretov V. F., Konoplin A. Yu. System of Automatically Correction of Program Trajectory of Motion of Multilink Manipulator Installed on Underwater Vehicle // Procedia Engineering. 2015. Vol. 100. P. 1441—1449.
3. Penalver A., Perez J., Fernandez J. J., Sales J., Sanz P. J., Garcia J. C., Fornas D., Marin R. Visually-guided manipulation techniques for robotic autonomous underwater panel interventions // Annual Reviews in Control 40. 2015. P. 201—211.
4. Filaretov V. F., Konoplin A. Yu., Konoplin N. Yu., Gorbachev G. V. Control system for underwater vehicle with

multilink manipulator for automatic manipulation operations // Proc. of the 27th DAAAM International Symposium, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, Vienna, Austria, 2016. P. 714–720. DOI: 10.2507/27th.daaam.proceedings.103.

5. Korn G. A. and Korn T. M. Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review. General Publishing Company, 2000. 1151 p.

6. Филаретов В. Ф., Коноплин А. Ю., Коноплин Н. Ю. Система для автоматического выполнения манипуляционных операций с помощью подводного робота // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. № 8. Т. 18. С. 543–549.

7. Schneider P. J., Eberly D. H. Geometric Tools for Computer Graphics. New York: Elsevier Science Inc., 2002.

8. Tritech Eclipse. Multibeam Sonar for 3D Model View of Sonar Imagery. URL: <http://www.tritech.co.uk/>

9. BlueView 3D Multibeam Scanning Sonar. URL: <http://www.teledynemarine.com/>

10. Marton Z., Rusu R., Beetz M. On Fast Surface Reconstruction Methods for Large and Noisy Datasets // Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2009. Kobe, Japan. P. 3218–3223.

11. Point Cloud Library: Fast triangulation of unordered point clouds. URL: <http://ns50.pointclouds.org/>

12. Möller T., Trumbore B. Fast, Minimum Storage Ray-Triangle Intersection // Journal of Graphics Tools (JGT), 2(1):21–28, October 1997. 254.

13. Filaretov V. F., Yukhimets D. A., Konoplin A. Yu. Synthesis of System for Automatic Formation of Multilink Manipulator Velocity // The Second RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM 2014), Tehran IRAN, International IEEE Conference. 2014. P. 785–790. DOI: 10.1109/ICRoM.2014.6990999.

Supervisory Control Method for Manipulator Mounted on Underwater Robot

V. F. Filaretov^{1,3}, filaretov@inbox.ru, A. Yu. Konoplin^{2,3}, konoplin@marine.febras.ru✉,
N. Yu. Konoplin^{2,3}, konoplin.nikita@gmail.com,

¹ Institute of Automation and Control Processes, Vladivostok, 690041, Russian Federation

² Institute of Marine Technology Problems, FEB RAS, Vladivostok, 690091, Russian Federation

³ Far Eastern Federal University, Vladivostok, 690091, Russian Federation

Corresponding author: Konoplin Aleksandr Yu., Ph. D., Head of Laboratory,
Institute of Marine Technology Problems, FEB RAS, Far Eastern Federal University,
Vladivostok, 690091, Russian Federation, e-mail: konoplin@marine.febras.ru

Accepted on October 19, 2017

At present, the underwater vehicles equipped with multilink manipulators are used to perform a wide range of survey, technological and research operations in the depths of the world ocean. But in most cases, said manipulation operations are performed in a manual mode with help of the specially trained operators of the underwater vehicles. Based on their experience and knowledge, these operators plan the trajectories of working tools of underwater manipulators. However, it is very difficult for the operator to quickly and accurately solve manipulation tasks without direct contact with the working object and identifying the location of this object of work with help of video images. This leads to the performance decreasing of his work and to the probability increasing of the errors. The work proposes the new method for the supervisory implementation of manipulative operations by means of multilink manipulators mounted on underwater vehicles. This method involves the construction of mathematical models of objects of work with the help of on-board sonars. Herewith, the formation of target points and spatial trajectories of the manipulator's working tools is carried out by means of the targeting of the optical axis of the camera taking into account the requirements for the implementation of specific technological operations. The developed method can be used to perform many underwater manipulation operations in the supervisory mode.

Keywords: supervisory implementation, underwater robot, multilink manipulator, point cloud, underwater operations, spatial trajectory, mathematical model, deep-sea research, control system

For citation:

Filaretov V. F., Konoplin A. Yu., Konoplin N. Yu. A Supervisory Control Method for Manipulator Mounted on Underwater Robot, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 2, pp. 95–99.

DOI: 10.17587/mau.19.95-99

References

1. Dubrovin F. S., Scherbatyuk A. F. Development of Algorithms for an Autonomous Underwater Vehicle Navigation with a Single Mobile Beacon: The Results of Simulations and Marine Trials, *Proc. of the XXIth International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2015*, Saint Petersburg, Russia, pp. 144–152.

2. Filaretov V. F., Konoplin A. Yu. System of Automatically Correction of Program Trajectory of Motion of Multilink Manipulator Installed on Underwater Vehicle, *Procedia Engineering*, 2015, vol. 100, pp. 1441–1449.

3. Penalver A., Perez J., Fernandez J. J., Sales J., Sanz P. J., Garcia J. C., Fornas D., Marin R. Visually-guided manipulation techniques for robotic autonomous underwater panel interventions, *Annual Reviews in Control*, 2015, vol. 40, pp. 201–211.

4. Filaretov V. F., Konoplin A. Yu., Konoplin N. Yu., Gorbachev G. V. Control system for underwater vehicle with multilink manipulator for automatic manipulation operations. Proceedings of the 27th DAAAM International Symposium, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, Vienna, Austria, 2016, pp. 714–720. DOI: 10.2507/27th.daaam.proceedings.103.

5. Korn G. A. and Korn T. M. Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review, General Publishing Company, 2000, 1151 p.

6. Filaretov V. F., Konoplin A. Yu., Konoplin N. Yu. Sistema dlja avtomaticheskogo vypolnenija manipulacionnyh operacij s pomoshh'ju podvodnogo robota (System for automatic implementation of manipulative operations by means of underwater robots), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, no. 8, pp. 543–549 (in Russian).

7. Schneider P. J. and Eberly D. H. Geometric Tools for Computer Graphics. Elsevier Science Inc., New York, 2002.

8. Tritech Eclipse. Multibeam Sonar for 3D Model View of Sonar Imagery, available at: <http://www.tritech.co.uk/>

9. BlueView 3D Multibeam Scanning Sonar, available at: <http://www.teledynemarine.com/>

10. Marton Z., Rusu R. and Beetz M. On Fast Surface Reconstruction Methods for Large and Noisy Datasets, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2009, Kobe, Japan, pp. 3218–3223.

11. Point Cloud Library: Fast triangulation of unordered point clouds, available at: <http://ns50.pointclouds.org/>

12. Möller T. and Trumbore B. Fast, Minimum Storage Ray-Triangle Intersection, *Journal of Graphics Tools (JGT)*, 2 (1): 21–28, October 1997. 254.

13. Filaretov V. F., Yukhimets D. A., Konoplin A. Yu. Synthesis of System for Automatic Formation of Multilink Manipulator Velocity, *The Second RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM 2014)*, Tehran IRAN, International IEEE Conference, 2014, pp. 785–790, DOI: 10.1109/ICRoM.2014.6990999.

Е. С. Брискин, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. кафедрой, dtm@vstu.ru,
Н. Г. Шаронов, канд. техн. наук, доц., ст. науч. сотр., sharonov@vstu.ru,
В. С. Барсов, студент, barsov-19981703@mail.ru,
Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград

Об энергетически эффективных режимах движения роботов с поворотнo-заклинивающими движителями¹

Рассматриваются поворотнo-заклинивающие движители. Проанализированы особенности работы основного модуля таких движителей, проявляющиеся в экологичности, энергоэффективности, проходимости. Поставлена задача определения параметров и расписания движения элементов движителя, обеспечивающих минимум энергозатрат. Установлено, что эти параметры зависят от геометрических особенностей окружающей среды. Получены уравнения, которые обеспечивают решение поставленной задачи.

Ключевые слова: поворотнo-заклинивающий движитель, тепловые потери, уравнения Эйлера—Пуассона

Введение

Наиболее часто при разработке мобильных роботов применяются колесные и гусеничные движители [1]. Используются и шагающие движители [2], преимущество которых является более высокая грунтовая и профильная проходимость [3], а недостатками — сравнительно малая скорость роботов, усложнение конструкции и системы управления [4]. Еще одно преимущество движителей, дискретно взаимодействующих с грунтом, проявляется в более высокой экологичности, что актуально в сельском, лесном хозяйствах и т.д. (рис. 1, см. третью сторону обложки).

Однако идеальные экологические движители — это движители, непосредственно не взаимодействующие с почвенным покровом. К таким движителям могут относиться поворотнo-заклинивающие движители [5], взаимодействующие с естественными (например, деревьями) или искусственными (например, столбами) твердыми телами, находящимися на грунте (рис. 2, см. третью сторону обложки).

В статье рассматриваются особенности работы поворотнo-заклинивающих движителей и задача определения параметров и расписания работы приводов движителя, обеспечивающих минимум энергозатрат.

1. Принцип работы поворотнo-заклинивающего движителя

Исследуемый поворотнo-заклинивающий движитель является естественным развитием заклинивающе-скользящего (рис. 3) [6]. Робот с таким движителем может перемещаться по вертикальному или наклонному столбу за счет периодического заклинивания одной из втулок и скольжения другой. Если с одной из втулок связать стержень с управля-

емой длиной и возможностью его поворота вокруг своей оси, то реализуется возможность и вращательного движения в пространстве [7] (рис. 4).

Такой способ перемещения обладает следующими преимуществами:

- отсутствие взаимодействия с опорной поверхностью, а в случае лесозаготовок, где роль вертикальных столбов выполняют деревья, — с экологически ранимым почвенным покровом;
- отсутствие необходимости перемещения достаточно массивного (для обеспечения статической устойчивости всего робототехнического комплекса) шасси;
- возможность перемещения по неровной поверхности, в частности по крутым склонам, что, в частности, может быть использовано при обслуживании технологического оборудования железных дорог на крутых насыпях без опоры на железнодорожное полотно.

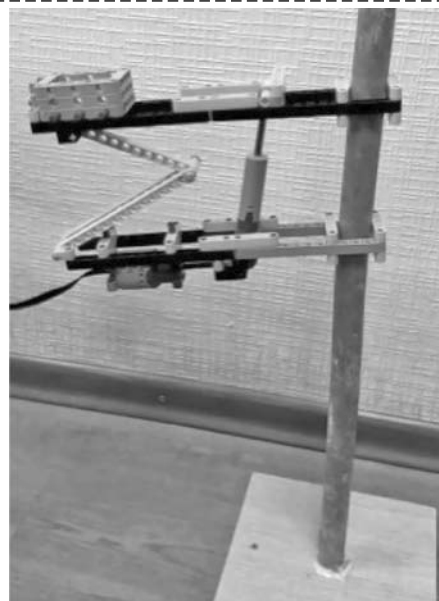


Рис. 3. Заклинивающе-скользящий движитель (ВолгГТУ)

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-01-00675 а.

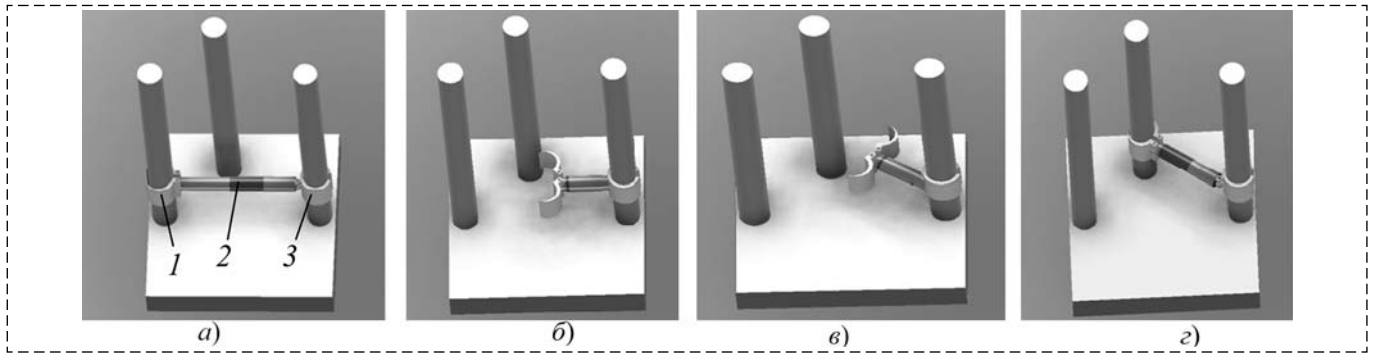


Рис. 4. Поворотно-заклинивающий движитель:

a — начальное положение; *б* — расклинивание втулки-схвата 1 и укорочение стрелы движителя за счет работы привода поступательного движения 2; *в* — поворот стрелы движителя за счет работы привода поворота 3; *з* — удлинение стрелы движителя за счет работы привода поступательного движения 2 до заклинивания втулки-схвата 1

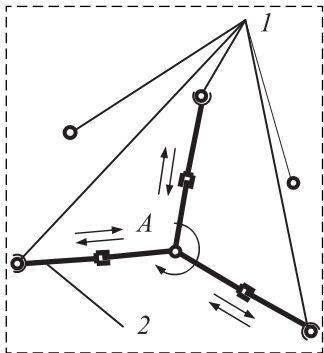


Рис. 5. Пример соединения модулей в звездообразную сеть:

1 — неподвижные опоры (деревья), 2 — модуль движителя

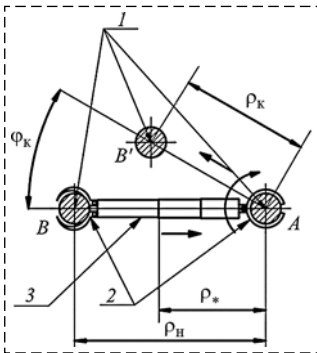


Рис. 6. Расчетная схема поворотно-заклинивающего движителя:

1 — вертикальные опоры, 2 — поворотно-заклинивающие втулки, 3 — стрела с изменяемой длиной

К недостаткам относится тот факт, что требуется удаленный источник энергии, связь с которым осуществляется по кабелю переменной длины.

Кинематическая схема робота может содержать и промежуточную опору *A* (рис. 5), обеспечивающую большую жесткость всей конструкции. Однако при всем разнообразии возможных кинематических схем основным модулем робототехнического комплекса является стрела 3 переменной длины, способная поворачиваться вокруг осей, проходящих через ее концы (рис. 6).

2. Постановка задачи о минимуме энергозатрат

Рассматривается механическая система, состоящая из стержня переменной длины, в начальный момент занимающая положение *AB* (рис. 6).

Перемещение стержня в положение *AB'* осуществляется за счет последовательного изменения длины стержня *AB* от первоначальной ρ_n до ρ_* за время τ_1 , поворота вокруг оси *A* на угол φ_k за время τ_2 и увеличения длины стержня от ρ_* до конечного значения ρ_k за время τ_3 .

Масса робота *m* сосредоточена на перемещаемом конце стрелы в точке *B*. Задается общее вре-

мя перемещения τ и расписание работы приводов τ_1, τ_2, τ_3 , причем

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3. \quad (2.1)$$

Ставится задача определения $\rho_*, \tau_1, \tau_2, \tau_3$, обеспечивающих минимум тепловых потерь *W* в приводе поворота стержня и приводе изменения его длины [8]:

$$W = \sum_{j=1}^3 W_j = \alpha \int_0^{\tau_1} F^2 dt + \alpha \int_0^{\tau_3} F^2 dt + \beta \int_0^{\tau_2} M^2 dt, \quad (2.2)$$

где *F* — усилие, развиваемое приводом изменения длины; *M* — момент, развиваемый приводом поворота; α, β — известные характеристики двигателей [9]; W_j — тепловые потери на каждом из этапов.

Если используются одинаковые двигатели в приводе изменения длины и приводе поворота, и генерируемая сила $F = M_1/R$, где M_1 — момент, развиваемый двигателем привода удлинения стрелы, *R* — приведенный радиус механизма преобразования вращательного движения ротора двигателя в поступательное движение стрелы, то $\alpha = \beta/R^2$.

3. Метод решения задачи о минимуме энергозатрат

Метод решения основан на требовании минимума функционала (2.2) на основе составления уравнений движения на каждом этапе с последующим определением параметров $\rho_*, \tau_1, \tau_2, \tau_3$.

Первый этап $0 < t < \tau_1$ изменения длины стержня описывается дифференциальным уравнением

$$m\ddot{x} = F, \quad (3.1)$$

причем при $t = 0$: $\rho = \rho_n, \dot{\rho} = 0$; при $t = \tau_1$: $\rho = \rho_*, \dot{\rho} = 0$.

Из уравнения Эйлера—Пуассона минимум первого интеграла в (2.2) достигается на программном движении в соответствии с дифференциальным уравнением

$$\frac{d^2}{dt^2} \left[\frac{\partial (m\ddot{x})^2}{\partial \ddot{x}} \right] = m^2 \ddot{x} = 0. \quad (3.2)$$

При заданных граничных условиях из соотношения (3.2) следуют уравнения движения

$$x = \frac{2(\rho_H - \rho_*)}{\tau_1^3} t^3 - \frac{3(\rho_H - \rho_*)}{\tau_1^2} t^2 + \rho_H, \quad (3.3)$$

откуда для тепловых потерь W_1 на первом этапе

$$W_1 = \alpha \int_0^{\tau_1} F^2 dt = \alpha \int_0^{\tau_1} m^2 \ddot{x}^2 dt = \alpha m^2 \frac{12(\rho_H - \rho_*)^2}{\tau_1^3}. \quad (3.4)$$

На втором этапе $0 < t < \tau_2$ при повороте стрелы на угол φ_K дифференциальное уравнение движения имеет вид

$$m\rho_*^2 \ddot{\varphi} = M, \quad (3.5)$$

причем при $t = 0$: $\varphi = 0$, $\dot{\varphi} = 0$; при $t = \tau_2$: $\varphi = \varphi_K$, $\dot{\varphi} = 0$.

Уравнение Эйлера—Пуассона имеет форму

$$\frac{d^2}{dt^2} \left[\frac{\partial(m\rho_*^2 \ddot{\varphi})^2}{\partial \ddot{\varphi}} \right] = m^2 \rho_*^4 \ddot{\varphi} = 0. \quad (3.6)$$

Решением является

$$\varphi = \frac{2\varphi_K t^3}{\tau_1^3} + \frac{3\varphi_K}{\tau_1^2} t^2, \quad (3.7)$$

а тепловые потери W_2 на втором этапе

$$W_2 = \beta \int_0^{\tau_2} M^2 dt = \beta \int_0^{\tau_2} m^2 \rho_*^4 \ddot{\varphi}^2 dt = \beta m^2 \rho_*^4 \frac{12\varphi_K^2}{\tau_2^3}. \quad (3.8)$$

Аналогично на третьем этапе $0 < t < \tau_3$ тепловые потери W_3 определяются выражением, подобным (3.4):

$$W_3 = \alpha m^2 \frac{12(\rho_* - \rho_K)^2}{\tau_3^3}. \quad (3.9)$$

Таким образом, суммарные тепловые потери W , с учетом (2.1), являются функцией семи задаваемых переменных: m , ρ_H , ρ_K , α , β , φ_K , τ и трех

определяемых оператором или формируемых системой управления переменных ρ_* , τ_1 , τ_3 :

$$W = 12m^2 \left\{ \alpha \left[\frac{(\rho_H - \rho_*)^2}{\tau_1^3} + \frac{(\rho_* - \rho_K)^2}{\tau_3^3} \right] + \beta \rho_*^4 \frac{\varphi_K^2}{(\tau - \tau_1 - \tau_3)^3} \right\}. \quad (3.10)$$

На рис. 7 представлены некоторые примеры зависимостей приведенных тепловых потерь $W/12m^2\alpha$ от переменных ρ_* , τ_1 , τ_3 при $\beta = 5\alpha$.

Характерной особенностью зависимости (3.10) является наличие минимума. Параметры, при которых он достигается, должны определяться системой управления в соответствии с решением системы нелинейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial W}{\partial \rho_*} = -\frac{\alpha}{\tau_1^3}(\rho_H - \rho_*) + \frac{\alpha}{\tau_3^3}(\rho_* - \rho_K) + \\ + 2\beta \rho_*^3 \frac{\varphi_K^2}{(\tau - \tau_1 - \tau_3)^3} = 0; \\ \frac{\partial W}{\partial \tau_1} = -\frac{\alpha(\rho_H - \rho_*)^2}{\tau_1^4} + \beta \rho_*^4 \frac{4\varphi_K^2}{(\tau - \tau_1 - \tau_3)^4} = 0; \\ \frac{\partial W}{\partial \tau_3} = -\frac{\alpha(\rho_* - \rho_K)^2}{\tau_3^4} + \beta \rho_*^4 \frac{4\varphi_K^2}{(\tau - \tau_1 - \tau_3)^4} = 0. \end{cases} \quad (3.11)$$

Однако, не решая полученную систему алгебраических уравнений, можно, проанализировав ее, получить закономерность

$$\left(\frac{\tau_3}{\tau_1} \right)^2 = \frac{\rho_K - \rho_*}{\rho_H - \rho_*}. \quad (3.12)$$

Установленная закономерность (3.12) позволяет упростить определение оптимальных параметров программного движения.

Заключение

1. Проанализированы достоинства и недостатки поворотного-заклинивающих движителей и даны рекомендации по их использованию.

2. Выделен базовый модуль поворотного-заклинивающего движителя. Совокупность таких модулей, объединенных соответствующим образом, позволяет формировать кинематическую схему робота для определенной эксплуатационной ситуации.

3. Установлены геометрические параметры ρ_* , ρ_H , ρ_K , φ_K и расписание работы приводов τ_1 , τ_2 , τ_3 , влияющие на энергоэффективные законы движения поворотного-заклинивающих движителей.

4. Полученные результаты, основанные на выбранной расчетной схеме, носят качественный характер. Для их использования при разработке конкретных робототехнических систем следует учитывать как внешние силы сопротивления движению, так и силы трения в приводах. Кроме

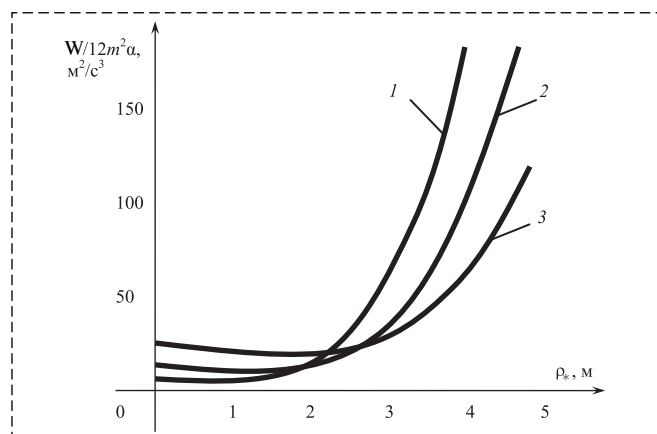


Рис. 7. Зависимость приведенных тепловых потерь при различных расписаниях движения τ_1 , τ_2 , τ_3 :

1 — $\tau_1 = \tau_3 = 4$ с, $\tau_2 = 2$ с; 2 — $\tau_1 = \tau_3 = 3$ с, $\tau_2 = 4$ с; 3 — $\tau_1 = \tau_3 = 2,5$ с, $\tau_2 = 5$ с

того, в инженерных расчетах следует использовать реальный момент инерции стрелы робота относительно оси вращения.

Список литературы

1. Юревич Е. И. Основы робототехники. СПб.: БХВ Петербург, 2005. 416 с.
2. Павловский В. Е. О разработках шагающих машин // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2013. № 101. 32 с.
3. Брискин Е. С., Чернышев В. В. Экспериментальные исследования динамики многоопорной шагающей машины с движителями лямбдаобразного вида // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1999. № 4. С. 32–37.
4. Briskin E., Zhoga V., Chernishev V., Maloletov A., Kalinin Y., Sharonov N. Walking machines (elements of theory, experience of elaboration, application) // Emerging Trends in Mobile Robotics: proc. of the 13th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines. Nagoya Inst. of Technology, Japan. 2010. P. 769–776.

5. Meaclem C. V., Gutschmidt S., Chen X. & Parker R. Kinematic and dynamic analysis of a brachiating tree-to-tree machine, 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. P. 1311.
6. Азарян Д. К., Малолетов А. В. Исследование условий равновесия робота с заклинивающим движителем при движении по стержню // Нелинейная динамика машин — School-NDM 2017 сборник IV Международной Школы-конференции молодых ученых. 2017. С. 107–112.
7. Брискин Е. С., Шаронов Н. Г., Кваша Ю. С., Скобелев М. О. О выборе геометрических параметров заклинивающе-поворотных движителей мобильных роботов // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2017. № 8 (203). С. 108–112.
8. Брискин Е. С., Калинин Я. В., Малолетов А. В. Об оценке эффективности цикловых механизмов // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2017. № 2. С. 13–19.
9. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины. В 2-х частях. Л.: Энергия, 1972. ч. 1. 543 с., ч. 2. 648 с.

On Energy Efficient Regimes of Robot Motion with Rotary-Wedging Propulsion Devices

E. S. Briskin, dtm@vstu.ru, N. G. Sharonov, sharonov@vstu.ru✉, V. S. Barsov, barsov-19981703@mail.ru, Volgograd State Technical University, Volgograd, 400005, Russian Federation

Corresponding author: Sharonov Nikolay G., Ph. D., Senior Researcher
Department of Theoretical Mechanics of Volgograd State Technical University,
Volgograd, 400005, Russian Federation, e-mail: sharonov@vstu.ru

Accepted on November 09, 2017

Rotary-wedging propulsion device are considering. The peculiarities of dynamics and control main module such propulsion devices have been analyzed. These peculiarities are manifesting in environmental, energy efficiency, possibility. The problem of determination of parameters and schedule of motion, providing the minimum energy consumption has been set. The authors consider a mechanical system consisting of a rod of variable length, at the initial time occupying a certain position. The movement of the rod to a new position is carried out by successively changing the length of the rod from the initial to the intermediate, turning about the axis by a certain angle, and extending the rod from the intermediate to the final value. The weight of the robot is concentrated on the movable end of the boom at a point. To solve the problem, specify the total movement time and schedule drives. Method of solution based on the requirement of a minimum of functionality based on the equations of motion at each stage, with subsequent determination of the parameters. These parameters are depended on geometric features of environment. The equations, providing the solving the task have been obtained.

Keywords: rotary-wedging propulsion device, heat losses, Euler-Poisson equation.

Acknowledgements: The reported study was funded by RFBR according to the research project № 17-01-00675 a.

For citation:

Briskin E. S., Sharonov N. G., Barsov V. S. On Energy Efficient Regimes of Robot Motion with Rotary-Wedging Propulsion Devices, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 2, pp. 100–103.

DOI: 10.17587/mau.19.100-103

References

1. Yurevich E. I. *Osnovy robototekhniki* (Fundamentals of robotics), BHV Petersburg, 2005, 416 p. (in Russian).
2. Pavlovsky V. E. *O razrabotkakh shagajushhih mashin* (For elaboration of walking machines), *Preprint of Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS*, 2013, no. 101, 32 p. (in Russian).
3. Briskin E. S., Chernyshev V. V. *Jeksperimental'nye issledovaniya dinamiki mnogoopornoj shagajushhej mashiny s dvizhiteljami ljambdaobraznogo vida* (Experimental studies of the dynamics multisupporting walking machines with movers lambda-row view), *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij, Mashinostroenie*, 1999. no. 4. pp. 32–37 (in Russian).

4. Briskin E., Zhoga V., Chernishev V., Maloletov A., Kalinin Y., Sharonov N. Walking machines (elements of theory, experience of elaboration, application), *Emerging Trends in Mobile Robotics: proc. of the 13th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*. Nagoya Inst. of Technology, Japan, 2010, pp. 769–776.
5. Meaclem C. V., Gutschmidt S., Chen X. & Parker R. Kinematic and dynamic analysis of a brachiating tree-to-tree machine, *2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 1311.
6. Azaryan D. K., Maloletov A. V. *Issledovanie uslovij ravnovesija robota s zaklinivajushhim dvizhitelem pri dvizhenii po sterzhnju* (The study of the conditions of equilibrium of the robot wedging the engine at movement on the rod), *Proceedings of School-NDM 2017*, pp. 107–112 (in Russian).
7. Briskin E. S., Sharonov N. G., Kvasha Y. S., Skobelev M. O. *Issledovanie uslovij ravnovesija robota s zaklinivajushhim dvizhitelem pri dvizhenii po sterzhnju* (On choice of the geometric parameters wedging-rotary type of mobile robots), *Izvestia VSTU*, 2017, № 8 (203), pp. 108–112 (in Russian).
8. Briskin E. S., Kalinin Ya. V., Maloletov A. V. Estimates of Efficiency of Cycle Mechanisms, *Mechanics of Solids*, 2017, 52 (2), pp. 128–133.
9. Kostenko M. P., Piotrovsky L. M. *Jelektricheskie mashiny* (Electric machine), Leningrad, Energiya, 1972, Part 1, 543 p., Part 2. 648 p. (in Russian).

Т. М. Волосатова, канд. техн. наук, доц., tamaravol@gmail.com, А. В. Козов, alexey.kozov@gmail.com, МГТУ им. Н. Э. Баумана

Особенности методов распознавания образов в автоматической системе управления поворотом мобильного робота

Рассмотрена задача построения системы компьютерного зрения для управления мобильным роботом. Разработаны основные требования к системе управления мобильным роботом, определен выбор операционной системы для мобильного робота. Приведен обзор и выполнено сравнение методов распознавания заданного объекта на изображении с использованием современных программных инструментов и с учетом ограничений мобильных вычислительных платформ. По итогам сравнения для реализации в прототипе системы управления был выбран метод контурной сегментации и последующего сравнения контуров. Реализация прототипа системы управления была выполнена в виде исполняемого приложения в среде ROS. Реализованная система успешно протестирована в робототехническом симуляторе Gazebo. Исследования возможности оценки расстояния до распознаваемого объекта, а также эффективность комбинаций различных методов могут быть дальнейшими направлениями развития данной работы.

Ключевые слова: компьютерное зрение, распознавание образов, мобильный робот, система управления, эффективность распознавания

Введение

Системы технического (или компьютерного) зрения являются неотъемлемой частью систем управления многих робототехнических комплексов [1]. С помощью методов компьютерного зрения может быть решен широкий спектр задач, связанных с ориентацией во внешнем пространстве, определением расстояний до объектов, визуальной одометрией, распознаванием объектов окружения. К таким задачам относится управление мобильным роботом на основе распознавания изображений, получаемых с бортовой камеры. На кадрах необходимо распознать и локализовать некоторый заранее заданный объект, после чего нужно управлять роботом таким образом, чтобы сохранять распознанный объект в поле зрения камеры робота, т.е. следить за объектом. В рассматриваемом устройстве изменяется только угловая скорость робота, а камера неподвижно закреплена на его корпусе, оптическая ось камеры соосна продольной оси робота. Также принято допущение о совпадении вершины угла обзора камеры γ с осью поворота робота. Угол α , на который робот должен повернуться, соответствует углу между направлением на объект и продольной осью робота (рис. 1).

В рассматриваемой задаче принято допущение, что распознаваемый объект обладает маркером — определенной графической меткой, образ которой априорно известен, по которой выполняется поиск и распознавание объекта. Для распознавания маркера на изображении существует большое число методов. Наиболее просты методы поиска по шаблону, которые отыскивают на изображении наиболее похожий на искомым образ фрагмент. Однако такие методы не обладают инвариантностью к искажениям распознавае-

мого образа. Методы на основе сегментации используют для распознавания не искомого образа целиком, а только его некоторых наиболее характерных частей. В последнее время получили широкое распространение методы категориального распознавания. Они обладают высокой эффективностью, но их практическое применение ограничено необходимостью предварительного обучения и тонкой настройки их параметров.

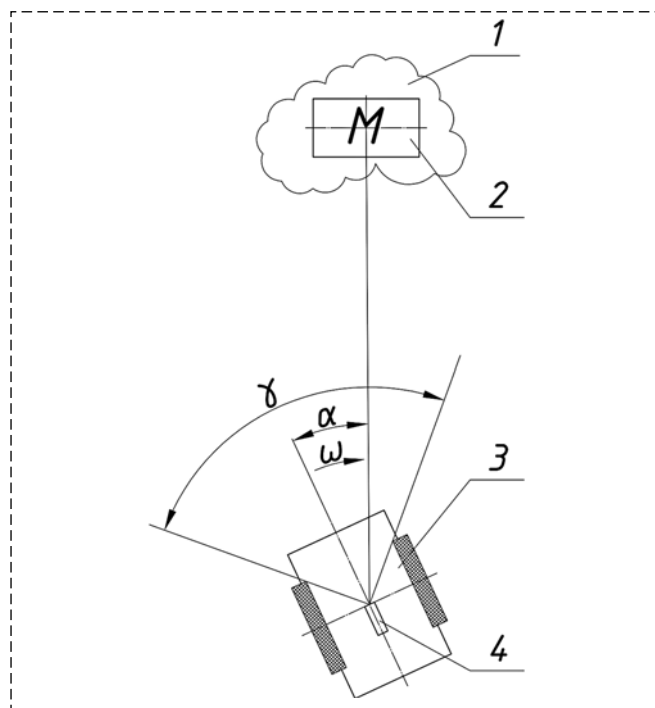


Рис. 1. Задача управления угловой скоростью мобильного робота:

1 — распознаваемый объект; 2 — маркер на объекте; 3 — мобильный робот; 4 — камера робота

Благодаря существенному прогрессу в области технического зрения сегодня имеется широкий спектр инструментов и методов для решения задач автоматизированного распознавания образов [2], а развитие микропроцессорных технологий позволяет оснащать даже сравнительно небольшие мобильные робототехнические комплексы мощными процессорами уровня Intel Core i7. Однако увеличение вычислительной мощности бортового процессора негативно сказывается на автономности комплекса из-за увеличения его энергопотребления. Поэтому на мобильных роботах предпочтительнее установка мобильных вычислительных систем на одном кристалле с высокой энергоэффективностью, но меньшей производительностью. Ограничения по вычислительным ресурсам можно обойти, если использовать облачные вычисления, когда наиболее ресурсоемкие задачи рассчитываются на удаленном сервере. При таком подходе необходимо решать дополнительные задачи, связанные с синхронизацией данных и обеспечением надежности канала связи с сервером. Операционной системой, в которой должна работать рассматриваемая система, является облегченная версия дистрибутива Ubuntu версии 14.04. Доступные вычислительные ресурсы робота соответствуют двоядерному процессору Intel Atom частотой до 1,5 МГц и одному гигабайту оперативной памяти.

Требование работы в реальном времени подразумевает, что обработка кадров с камеры робота будет проводиться быстрее, чем частота съемки кадров. Например, если камера работает с частотой 30 кадров в секунду, система управления должна успеть обработать отдельный кадр и сгенерировать управляющий сигнал за время, не превышающее 33 мс. При этом необходимо иметь резерв вычислительных ресурсов для решения других задач по управлению робототехническим комплексом. Выполнение таких ограничений возможно в том числе за счет изменения настроек камеры (уменьшения частоты или разрешения).

В настоящее время существует большое число различных программных инструментов, предназначенных для облегчения разработки программ для робототехнических систем. Некоторые инструменты (например, Carnegie Mellon Robot Navigation Toolkit Carmen) предназначены для решения специализированных задач, другие являются расширением операционной системы, обеспечивая взаимодействие между разными компонентами (URBI, The OrocOS Toolchain). Также существуют программные робототехнические системы, созданные специально для разработки на конкретном языке программирования. Следует отметить, что наибольшее распространение получили программные системы, расширяющие возможности операционной системы и предоставляющие многофункциональные интерфейсы взаимодействия для программных и аппаратных компонентов. Эти системы постепенно вытесня-

ют или включают в себя специализированные инструменты. К таким метаоперационным системам относится Robot Operating System (ROS) [3], которая на сегодняшний день является, де-факто, стандартом робототехники.

ROS — программная среда с открытым исходным кодом (лицензия BSD), которая предоставляет набор инструментов для разработки и большое число готовых модулей, необходимых для управления роботом. Распространенность и простота системы определяют выбор ROS в качестве единой среды взаимодействия между различными компонентами системы управления. Таким образом, система должна поддерживать совместимость с ROS.

Немаловажным требованием к системе управления роботом является то, что она должна функционировать без непосредственного участия человека-оператора. Его участие допускается в момент первоначальной настройки робота для выбора распознаваемого объекта из некоторого заранее заданного перечня. В дальнейшем система управления должна работать автономно.

1. Методы распознавания объектов

Основой для создания подсистем компьютерного зрения является наиболее популярная на сегодняшний день библиотека OpenCV (Open Source Computer Vision) [4]. OpenCV — кроссплатформенная библиотека алгоритмов технического зрения, обработки изображений и машинного обучения с открытыми исходными кодами. Среди библиотек компьютерного зрения (OpenVX, VIGRA, CCV, SimpleCV и др.) она поддерживает наибольшее число языков программирования и наибольшее число реализованных методов обработки изображений. Также она обладает полным набором базовых примитивов для реализации новых алгоритмов. Описанные далее методы распознавания рассмотрены в контексте применения классов и функций из библиотеки OpenCV версии 2.4.13.2.

Для идентификации распознаваемого объекта в решаемой задаче применяется маркер — некоторое заранее выбранное изображение с определенными формой, размером и цветами. Его можно рассматривать также как единицу специального искусственного графического языка. С помощью маркера оптическим путем может передаваться некоторый объем информации, зависящий от размера тезауруса. Кроме того, по маркеру может быть определено положение камеры в пространстве [5]. Для создания маркера могут быть использованы как существующие специальные графические языки (например, коды Data Matrix или QR), так и определенные буквенно-цифровые сочетания (примером могут служить системы государственных регистрационных автомобильных номерных знаков). В данной работе в качестве од-

Рис. 2. Пример использованных для распознавания маркеров

ного из возможных маркеров использовано изображение, приведенное на рис. 2.

Одним из простейших методов распознавания заданного образа на изображении является метод сравнения с шаблоном. Функцию поиска объекта по шаблону можно представить следующим образом: изображение шаблона последовательно накладывается на исходное (тестовое) изображение, и между ними попиксельно вычисляется корреляция, а результат вычислений записывается в некоторую матрицу. Эту матрицу можно считать матрицей соответствия шаблона тому или иному фрагменту тестового изображения. В полученной матрице можно найти максимальное (или, в зависимости от алгоритма вычисления коэффициента корреляции, минимальное) значение. Положение этого значения в матрице будет соответствовать расположению наиболее похожего на распознаваемый объект фрагмента тестового изображения. В библиотеке OpenCV присутствует функция `matchTemplate(...)`, которая реализует подобный механизм сравнения. Она поддерживает шесть различных алгоритмов расчета коэффициента корреляции [6]. Особенностью реализации функции `matchTemplate(...)` является зависимость результата ее выполнения от соответствия размеров шаблона и распознаваемого маркера на тестовом изображении. Для корректной работы требуется серия изменений масштаба шаблона в заданных пределах с некоторым шагом и последовательный поиск полученных образцов на тестовом изображении. В качестве результата распознавания может быть выбран фрагмент, имеющий наилучшую по всей серии корреляцию с шаблоном. При этом необходимо определить пороговое значение корреляции для предотвращения ложноположительных срабатываний. Если наилучшее значение ниже порогового, то это значит, что маркер на тестовом изображении не найден. Однако для алгоритмов расчета коэффициента корреляции без нормализации это пороговое значение будет зависеть от параметров изображения-маркера.

Использование сегментации представляет другой подход к распознаванию образов. Сегментация — процесс разделения цифрового изображения на несколько областей или секторов, при котором пиксели внутри одной области имеют некоторые общие визуальные характеристики [7]. Для распознавания образов может быть применена контурная сегментация изображения, т. е. разбиение по внешним границам объектов. Выделенные контуры можно сравнивать по каким-либо характеристикам с выделенными аналогичным способом контурами на маркере для определения

степени их сходства. В OpenCV для поиска контуров есть функция `findContours(...)`, работающая с бинарными изображениями. Функция имеет необязательный параметр `hierarchy` — вектор, содержащий информацию о топологии обрабатываемого изображения [8]. При работе в режиме построения иерархии для каждого обнаруженного контура будет доступна информация о контурах: "родитель" (внутри которого расположен текущий), первый "потомок" (расположен внутри текущего) и "сосед" (на одном уровне иерархии). Благодаря такой информации становится возможной быстрая фильтрация найденных контуров по соответствию иерархии контуров на маркере. Отобранные таким способом контуры можно сравнить с контурами маркера по некоторой характеристике, инвариантной к масштабированию и повороту, например по нормализованным центральным моментам [9]. В OpenCV реализована функция `matchShapes(...)`, которая вычисляет эти характеристики контуров, сопоставляет их и возвращает неотрицательное действительное число, обозначающее, насколько контуры соответствуют друг другу.

Сегментация изображения также может быть применена при выделении характерных признаков (ключевых точек) — некоторых характерных локальных особенностей. К простейшим признакам относятся углы и границы на изображении. Однако такие признаки чувствительны к масштабированию, поэтому обычно применяют методы детектирования признаков, использующие информацию об окрестности точки [10]. Далее необходимо получить описание (дескриптор) признака, позволяющее идентифицировать объект и найти соответствия между характерными точками инвариантно к преобразованиям изображения. Распознавание объекта в таком случае может быть основано на сопоставлении дескрипторов признаков маркера и обрабатываемого изображения с учетом преобразований масштаба и перспективы. OpenCV обладает полным набором инструментов для реализации описанного подхода: абстрактные классы для детектирования (`FeatureDetector`), получения дескрипторов (`DescriptorExtractor`), их сравнения (`DescriptorMatcher`) и функции определения возможных преобразований перспективы `findHomography(...)`. Присутствуют реализации таких методов, как SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) и SURF (Speeded Up Robust Features) [11].

Решение задачи распознавания образов может быть основано на классификации объектов на изображении (категориальное распознавание). В этом случае необходимо определить набор признаков, по которым будет проводиться классификация, выбрать метод классификации и выполнить процедуру обучения классификатора. В качестве признаков могут выступать гистограммы направленных градиентов или примитивы Хаара. Для классификации можно воспользоваться, например, методом Виолы—Джонса, который

имеет высокую скорость и эффективность работы. Основу метода Виолы—Джонса составляют интегральное представление изображения по признакам Хаара, построение классификатора на основе алгоритма адаптивного бустинга и комбинирование классификаторов в каскадную структуру [12]. Представленный в OpenCV класс CascadeClassifier реализует метод Виолы—Джонса [13]. Он работает с предварительно обученным классификатором. Для обучения классификатора имеется утилита `opencv_traincascade`. На основе выборки из положительных (содержащих распознаваемый объект) и отрицательных (без распознаваемого объекта) примеров она формирует специальный XML-файл, описывающий обученный классификатор.

Для распознавания объектов также можно применять статистический анализ изображения. Например, для обнаружения объекта с вертикальными или горизонтальными контурами можно использовать детектор границ, и при проецировании на соответствующие оси по гистограммам яркости локализовать искомый объект. Однако для достижения инвариантности к поворотам и перспективным искажениям распознаваемого объекта необходимы дополнительные преобразования и проверки. Это снижает производительность и налагает ограничения на условия использования метода.

Также одним из вариантов построения системы распознавания, основанных на классификации, является использование искусственных нейронных сетей. Нейросетевой классификатор обладает высокой скоростью работы и робастностью, а главным недостатком является необходимость предварительного длительного обучения. Кроме того, необходима дополнительная работа по реализации и подбору оптимальных параметров нейронной сети. Указанные особенности затрудняют применение этого метода.

Сравнительный анализ эффективности методов распознавания

Для сравнения эффективности различных методов распознавания и локализации маркера разработано несколько специальных утилит [14]. Методы сравнивали на серии из 120 тестовых изображений (тестов) размером 1024 на 768 пикселей. Половина изображений содержала распознаваемый объект с маркером, остальные — нет. Тестовые изображения генерировались утилитой на основании двух отдельных изображений — переднего плана и фона. Передний план представляет собой снимок трехмерной сцены, построенной в робототехническом симуляторе Gazebo. На 3D-сцене могут быть представлены условные модели роботов, один из которых необходимо распознать по маркеру на борту, и несколько моделей окружения — дорога, здания. На таком изображении в графическом редакторе

однотонный фон был заменен на прозрачный. В качестве фоновых изображений были использованы фотографии реальной местности. Для получения тестового изображения образцы изображений переднего плана и фона совмещаются программой-генератором в различных комбинациях. Примеры полученных таким способом тестовых изображений представлены на рис. 3 (см. третью сторону обложки).

Утилита, выполняющая сравнение методов распознавания, в качестве параметра при запуске принимает путь к изображению-маркеру и список тестовых изображений. Во время работы она поочередно загружает и обрабатывает тесты согласно списку. По заданному алгоритму утилита определяет положение маркера на тестовом изображении и сравнивает координаты предполагаемого положения ("—1; —1" для случая, если маркер не обнаружен) с координатами реального положения, известного для каждого теста. При этом для каждого изображения фиксируется время работы алгоритма распознавания, а в конце выводится среднее по всей серии тестов время в миллисекундах и процент ошибок распознавания для каждого алгоритма.

Как отмечалось ранее, используемая в OpenCV функция сравнения с шаблоном использует один из шести реализованных алгоритмов расчета коэффициента корреляции. По результатам испытаний хорошие результаты показал алгоритм нахождения нормализованного коэффициента кросс-корреляции по формуле

$$C(i, j) = \frac{\sum_{i', j'} T(i', j') A(i + i', j + j')}{\sqrt{\sum_{i', j'} T(i', j')^2 \sum_{i', j'} A(i + i', j + j')^2}},$$

где $T(i, j)$ — (i, j) -й элемент матрицы дискретного изображения-образца; $A(i, j)$ — (i, j) -й элемент матрицы дискретного тестового изображения. Наилучшие результаты достигаются при 9...11 шагах изменения масштаба шаблона, дальнейшее увеличение числа шагов не приводит к увеличению точности (рис. 4). Хотя сама функция поиска по шаблону выполняется достаточно быстро (в зависимости от алгоритма, 40...50 мс), необходимость дополнительных изменений масштаба и повторного поиска существенно снижает общее быстродействие метода. При используемых размерах тестовых изображений применение этого метода затруднено из-за его низкой производительности.

Применение контурной сегментации требует предобработки изображения: размытия для уменьшения числа контуров и бинаризации с выделением границ. Для размытия была использована доступная в OpenCV функция `blur(...)`, для бинаризации — функция преобразования цвета `cvtColor(...)` и детектор границ `Canny(...)`. Оптимальное значение радиуса размытия тестового изображения составляет 3...4 пикселя, увеличение этого значения существенно увеличивает процент

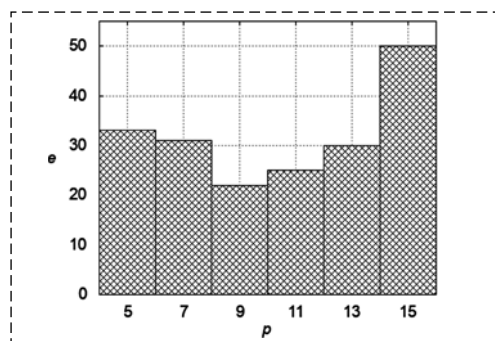


Рис. 4. Зависимость числа ошибок распознавания маркера от числа шагов изменения масштаба шаблона при использовании алгоритма нормализованного коэффициента кросс-корреляции:

p — число шагов изменения масштаба; e — процент ошибок распознавания

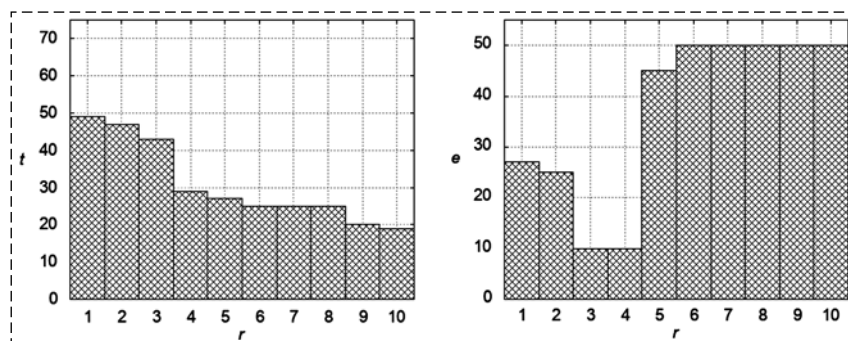


Рис. 5. Влияние величины пятна рассеяния (радиуса размыва тестового изображения) на скорость и качество распознавания:

r — радиус пятна рассеяния в пикселях; t — время обработки в миллисекундах; e — процент ошибок распознавания

ошибок (рис. 5). При сравнении контуров малого размера функцией `matchShapes(...)` могут быть получены высокие значения сходства. По этой причине контуры малого размера (до 15 пикселей) исключаются из числа сравниваемых для предотвращения ложноположительных срабатываний метода. Главным недостатком метода является его слабая устойчивость к помехам: зашумленность или частичная видимость маркера на тестовом изображении могут привести к невозможности корректного распознавания. Достоинствами же являются высокое быстродействие и хорошая точность распознавания в благоприятных условиях.

Эксперименты с различными реализациями представленных в OpenCV методов поиска объекта по характерным признакам показали их низкое быстродействие и невысокую эффективность, так как используемые маркеры не обладают достаточным числом характерных точек, на основании которых можно однозначно определить наличие или отсутствие маркера на тестовом изображении.

Сравнение различных методов распознавания

Метод	Достоинства	Недостатки
Сравнение с шаблоном	Простая реализация	Низкая скорость обработки, частые ложные срабатывания
Сравнение контуров	Простая реализация, высокая скорость работы, хорошая надежность	Метод может не работать при частичной видимости маркера на изображении
Выделение характерных признаков	—	Низкая скорость работы, не работает при используемых маркерах
Применение каскадного классификатора	Высокая скорость работы, наилучшая надежность	Длительное время обучения, необходимость дополнительной работы по подготовке обучающей выборки для каждого маркера

Построенная с помощью каскадного классификатора система распознавания обладает достаточным быстродействием (до 150 мс для обработки одного тестового изображения) и высокой надежностью, в том числе для случаев зашумленного изображения или частичного перекрытия маркера другим объектом. Главным недостатком такого подхода является необходимость предварительного обучения, для которого нужно большое число положительных и отрицательных примеров. Само обучение может занимать в зависимости от сложности маркера от нескольких часов до суток при обработке на персональном компьютере среднего уровня, что может существенно осложнить подбор оптимального маркера.

Достоинства и недостатки рассмотренных методов приведены в таблице. По итогам сравнения для реализации в прототипе системы управления был выбран метод контурной сегментации и последующего сравнения контуров. Также можно отметить, что хорошим потенциалом могут обладать комбинации методов, например, предварительная локализация возможного местоположения маркера с помощью контурной сегментации и последующее сравнение с шаблоном, масштаб которого изменен в соответствии с размерами контура.

2. Реализация системы управления роботом

Система управления поворотом робота должна работать в среде ROS, что налагает определенные требования к ее структуре. Основу любого ROS-приложения составляют пакеты, объединяющие исполняемые файлы, библиотеки, файлы конфигурации и другие ресурсы. Основной функциональной единицей системы является узел (node), работающие узлы можно представить в виде графа связей одноранговых точек-процессов, связанных через инфраструктуру ROS. Такие узлы могут обмениваться информацией посредством тем (topic), сервисов (service) и параметров (parameter). Тема представляет собой асинхронный поток данных, который генерируется од-

ним или несколькими издателями (publisher) и на который могут быть подписаны узлы-читатели (subscriber). Сервисы реализуют синхронный обмен информацией по схеме "запрос—ответ", а параметры позволяют сохранять данные в некотором общем хранилище — сервере параметров.

Реализация прототипа системы управления была выполнена в виде одного ROS-пакета. Этот пакет содержит исходный код программы исполняемого модуля, файлы запуска и конфигурации. Исполняемый файл (узел) написан на C++ с использованием средств ROS.

При запуске реализованного прототипа программа выполняет загрузку изображения заранее подготовленного маркера-образца в формате OpenCV. Предобработка включает перевод изображения в оттенки серого и размытие с помощью функции OpenCV `blur(...)`. Далее происходит обнаружение и расчет характеристик контуров. Изображение с камеры робота подвергается предобработке аналогично маркеру-образцу. На подготовленном таким образом кадре происходит обнаружение контуров, по параметрам которых выполняется распознавание. Для уменьшения числа сравнений активно используется иерархия: для сравнения отбираются только те контуры, которые проходят простые проверки на наличие одного общего контура-родителя. Проверка формы контура-родителя также позволяет отсеять большое число неперспективных контуров (например, слишком вытянутых в ширину или в высоту). Еще одним реализованным фильтром является проверка на минимальный размер — если контур меньше 15 пикселей по меньшему измерению, велика вероятность ложного срабатывания при сравнении моментов, поэтому такие контуры исключаются. Среди обнаруженных описанным способом серий одноранговых по топологии контуров выбирается та группа, которая имеет наибольшее среднее значение соответствия контурам маркера-образца. Если такое значение меньше 0,5, то считается, что распознаваемый образ не найден на текущем кадре.

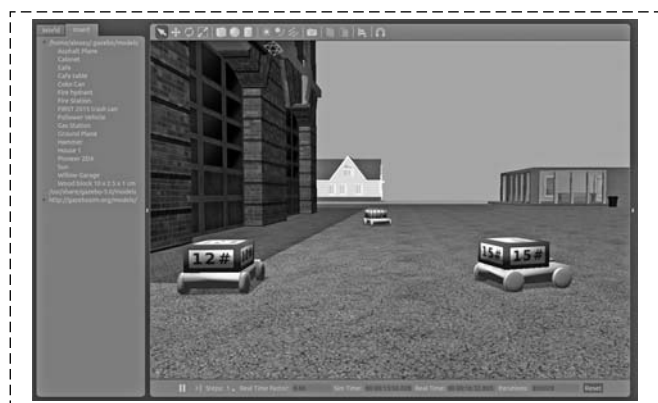


Рис. 6. Испытание реализованной системы управления в робототехническом симуляторе Gazebo. Представлена трехмерная сцена с моделями трех роботов, модель по центру разворачивается на месте в соответствии с перемещениями модели справа

После локализации маркера на кадре можно определить смещение центра распознанного маркера относительно центра кадра. В простейшем случае, если известна информация об угле обзора камеры по горизонтали, то, пренебрегая нелинейными искажениями оптического объектива, можно рассчитать точное направление на объект с маркером. После этого можно получить значение угловой скорости ω , которую необходимо сообщить роботу для поворота за заданное время (с учетом ограничений допустимой скорости). В случаях, когда информация об углах обзора камеры недоступна, необходимые значения угловой скорости можно подобрать экспериментально, наибольшие значения назначаются при максимальном смещении маркера от центра кадра по горизонтальной оси, а при совпадении их центров принимаются равными нулю. В случаях, когда распознаваемый объект движется относительно робота, необходимы вычисления поправок значений угловой скорости для компенсации возможного запаздывания поворота [15]. Реализованная система успешно протестирована в робототехническом симуляторе Gazebo (рис. 6).

Заключение

Для решения задачи по созданию автоматической системы управления мобильным роботом на основе компьютерного зрения было проведено сравнение различных методов распознавания заданного объекта на изображении. Получены показатели эффективности и производительности для четырех различных методов: сравнение с шаблоном, сравнение контуров, сопоставление ключевых точек, метод Виолы—Джонса. Метод, основанный на контурной сегментации и сравнении контуров, обладает оптимальным сочетанием достоинств и недостатков для применения в прототипе системы управления поворотом мобильного робота. При испытаниях реализованного прототипа с использованием робототехнического симулятора этот метод показал хорошую эффективность и надежность. Исследования возможности оценки расстояния до распознаваемого объекта, а также эффективность комбинаций различных методов могут быть дальнейшими направлениями развития данной работы.

Список литературы

1. Буняков В. А., Юревич Е. И. Техническое зрение в робототехнике. СПб.: Астерион, 2008. 67 с.
2. Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю., Бондаренко А. В., Ососков М. В., Моржин А. В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения. М.: Физматкнига, 2010. 672 с.
3. Mahtani A., Sanchez L., Fernandez E. Effective Robotics Programming with ROS. — Packt Publishing, 2016. 468 с.
4. Bradski G., Kaehler A. Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library. — O'Reilly Media, Inc., 2008.
5. Гудаев О. А. Распознавание маркеров расширенной реальности ARGET робототехнической системой // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2006. Т. 71. № 16.

6. **OpenCV 2.4.13.1** documentation — Object Detection, электронный ресурс http://docs.opencv.org/2.4/modules/imgproc/doc/object_detection.html (дата обращения 31.01.2017).
7. **Arbelaez P., Maire M., Fowlkes C., Malik J.** Contour detection and hierarchical image segmentation // *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*. 2011. Т. 33. N 5. С. 898—916.
8. **OpenCV 2.4.13.1** documentation — Structural Analysis and Shape Descriptors, электронный ресурс http://docs.opencv.org/2.4/modules/imgproc/doc/structural_analysis_and_shape_descriptors.html (дата обращения 31.01.2017).
9. **Hu M. K.** Visual pattern recognition by moment invariants // *IRE transactions on information theory*. 1962. Т. 8. N. 2. С. 179—187.
10. **Lowe D. G.** Object recognition from local scale-invariant features // *Computer vision, 1999. The proceedings of the seventh IEEE international conference on*. — IEEE, 1999. Т. 2. С. 1150—1157.
11. **OpenCV 2.4.13.1** documentation — features2d. 2D Features Framework, электронный ресурс <http://docs.opencv.org/2.4/modules/features2d/doc/features2d.html> (дата обращения 31.01.2017).
12. **Viola P., Jones M.** Rapid object detection using a boosted cascade of simple features // *Computer Vision and Pattern Recognition, 2001. CVPR 2001. Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on*. IEEE, 2001. Т. 1. С. 1-511—1-518.
13. **OpenCV 2.4.13.1** documentation — Cascade Classification, электронный ресурс http://docs.opencv.org/2.4/modules/objdetect/doc/cascade_classification.html (дата обращения 31.01.2017).
14. **Comparison of object detection methods**, электронный ресурс <http://github.com/vvozokk/object-detecting> (дата обращения 31.01.2017).
15. **Benavidez P., Jamshidi M.** Mobile robot navigation and target tracking system // *System of Systems Engineering (SoSE), 2011 6th International Conference on*. IEEE, 2011. С. 299—304.

Features of Pattern Recognition Methods for the Turn Control System of Mobile Robot

T. M. Volosatova, tamaravol@gmail.com✉, **A. V. Kozov**, alexey.kozov@gmail.com,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow 105005, Russian Federation

*Corresponding author: Volosatova T. M., Ph. D., Associate Professor,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation,
e-mail: tamaravol@gmail.com*

The paper considers the problem of designing the automatic control system of robot based on computer vision. The paper contains the problem formulation of designing the computer vision system to control mobile robot and describes restrictions and basic requirements for control system. The choice of the operating system for mobile robot is described. The paper also contains overview and comparison of recognition methods of the specified object in the image using modern program tools and considering restrictions of mobile computing platforms. The following methods have been analyzed: detection using a marker, pattern matching, image detection and contour matching, feature detections, object classification, method of statistical image analysis, application of artificial neural networks. The paper describes possible ways to implement these methods using OpenCV library. Experiments with OpenCV implementations have been made, and also main advantages and disadvantages of compared methods have been determined. As the result of comparison the method of image segmentation and contour matching has been chosen to be implemented in control system prototype. The paper also describes the implemented prototype of the mobile robot angular velocity control system, which is based on pattern recognition system. The implemented system has been tested in a robotic simulator Gazebo. Research of possibility of distance measurement to a recognized object, as well as research of the effectiveness of different methods combinations can be further directions of development of this work.

Keywords: computer vision, pattern recognition, mobile robot, control system, recognition efficiency

For citation:

Volosatova T. M., Kozov A. V. Features of Pattern Recognition Methods for the Turn Control System of Mobile Robot, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 2, pp. 104—110.

DOI: 10.17587/mau.19.104-110

References

1. **Bunyakov V. A., Yurevich E. I.** *Tekhnicheskoe zrenie v robototekhnike* (Machine vision in robotics), St. Petersburg, Asterion, 2008, 67 p. (in Russian).
2. **Vizilter Yu., Zheltov S. Yu., Bondarenko A. V., Ososkov M. V., Morgins A. V.** *Obrabotka i analiz izobrazhenij v zadachah mashinnogo zreniya* (Processing and analysis of images in tasks of machine vision), Moscow, Fizmatkniga, 2010, 672 p. (in Russian).
3. **Mahtani A., Sanchez L., Fernandez E.** *Effective Robotics Programming with ROS*, Packt Publishing, 2016. 468 c.
4. **Bradski G., Kaehler A.** *Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library*, O'Reilly Media, Inc., 2008.
5. **Gudaev O. A.** *Raspoznavanie markerov rasshirennoj real'nosti ARGET robototekhnicheskoy sistemoj* (Recognition of augmented reality markers ARGET with robotic system), *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2006, vol. 71, no. 16 (in Russian).
6. **OpenCV 2.4.13.1** documentation — Object Detection, available at: http://docs.opencv.org/2.4/modules/imgproc/doc/object_detection.html
7. **Arbelaez P., Maire M., Fowlkes C., Malik J.** Contour detection and hierarchical image segmentation, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, vol. 33, no. 5, pp. 898—916.
8. **OpenCV 2.4.13.1** documentation — Structural Analysis and Shape Descriptors, available at: http://docs.opencv.org/2.4/modules/imgproc/doc/structural_analysis_and_shape_descriptors.html
9. **Hu M. K.** Visual pattern recognition by moment invariants, *IRE Transactions on Information Theory*, 1962, vol. 8, no. 2, pp. 179—187.
10. **Lowe D. G.** Object recognition from local scale-invariant features, *Computer vision, The proceedings of the seventh IEEE international conference on*, 1999, vol. 2, pp. 1150—1157.
11. **OpenCV 2.4.13.1** documentation — features2d. 2D Features Framework, available at: <http://docs.opencv.org/2.4/modules/features2d/doc/features2d.html>
12. **Viola P., Jones M.** Rapid object detection using a boosted cascade of simple features, *Computer Vision and Pattern Recognition, Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on*, 2001, vol. 1. pp. 1-511—1-518.
13. **OpenCV 2.4.13.1** documentation — Cascade Classification, available at: http://docs.opencv.org/2.4/modules/objdetect/doc/cascade_classification.html
14. **Comparison of object detection methods**, available at: <http://github.com/vvozokk/object-detecting>
15. **Benavidez P., Jamshidi M.** Mobile robot navigation and target tracking system, *System of Systems Engineering, 2011 6th International Conference on*. IEEE, 2011, pp. 299—304.

В. В. Инсаров, д-р техн. наук, зам. начальника подразделения, wiliam@gosniias.ru,
С. В. Тихонова, вед. инженер, svetico@yandex.ru, **С. А. Дронский**, вед. инженер, sergey.dronsky@gosniias.ru,
Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, Москва

Концепция построения интеллектуальных систем управления автономных беспилотных летательных аппаратов с реализацией функции ситуационной осведомленности¹

Рассматривается концепция построения интеллектуальной системы управления автономных беспилотных летательных аппаратов (АБЛА), реализующей в процессе полета функцию ситуационной осведомленности. Ключевыми компонентами такой системы являются: наземная система подготовки полетных заданий; бортовая система технического зрения. Приведен пример процесса априорного ситуационного анализа условий применения АБЛА, направленного на выполнение поставленной целевой функции.

Ключевые слова: ситуационная осведомленность; беспилотные летательные аппараты; автономные системы управления; интеллектуальные системы; бортовые системы технического зрения

Введение

В настоящее время совершенно очевидно, что среди многих факторов, призванных обеспечить существенное повышение эффективности функционирования систем самого различного назначения (технических, робототехнических, организационных, организационно-технических и т.п.), одним из главенствующих является фактор использования информационной осведомленности о состоянии внешней среды и самой системы. В первом случае речь идет о самом широком спектре внешних воздействий, во многих случаях носящих характер целенаправленного противодействия возможности выполнения системой поставленной перед ней целевой функции. Во втором случае речь идет о возникающих непредвиденных внутренних ситуациях, таких как отказы элементов аппаратуры, нарушения информационной безопасности, сбой программного обеспечения, конфликты в коллективе и т.д. и т.п.

Показателями качества информационной осведомленности могут служить такие факторы, как полнота информации, ее достоверность и оперативность, отображающие настоящее (текущую ситуацию), будущее (поставленные цели), прошлое (прогресс в достижении цели), другие значимые факторы, критичные для принятия

решений. Совершенно очевидно, что снижение таких показателей может привести к принятию необоснованных (ошибочных) управленческих решений. В конечном счете это приводит к существенному снижению показателей эффективности функционирования рассматриваемой системы или даже к полному нарушению такого функционирования.

В достаточно общем виде все выше сказанное может быть представлено моделью системы управления Эндсли (Endsley), впервые сформулировавшего основные положения теории ситуационной осведомленности [1, 2].

В соответствии с этой моделью (рис. 1) процесс функционирования системы представлен тремя компонентами: информационным, обеспечивающим ситуационную осведомленность с заданными показателями качества; управляющим, обеспечивающим выбор способа достижения поставленной цели на основе принятого решения; исполнительным, реализующим действие, соответствующее выбранному способу достижения поставленной цели.

Информационный компонент включает три уровня:

- знание того, что происходит вокруг (уровень 1);
- осознание значения собственных действий и действий других участников ситуации (уровень 2);
- представление сценария развития ситуации (уровень 3).

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 17-08-00584а.

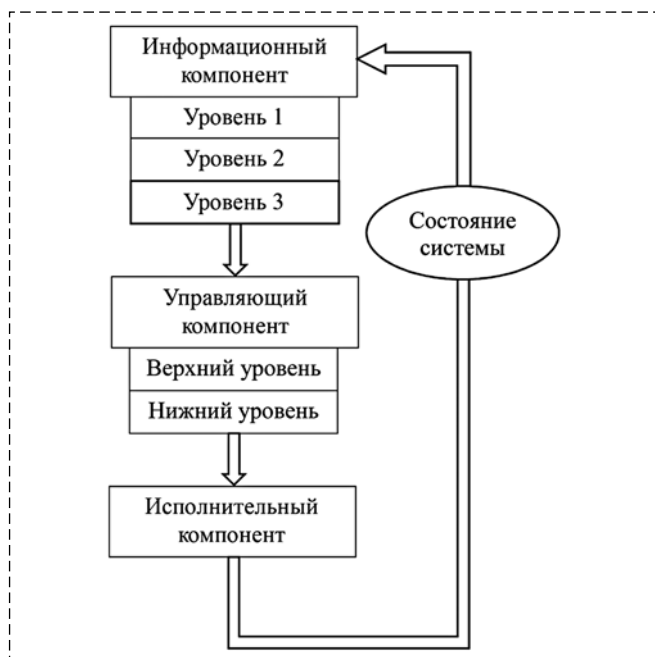


Рис. 1. Модель системы управления

Управляющий компонент включает два уровня управления:

- верхний уровень, определяющий целеполагание, постановку определенной цели функционирования, выбор одной из определенного множества конкретных типовых ситуаций (ТС); решение задачи целеполагания целиком возлагается на лицо, принимающее решение (ЛПР); разработчики алгоритмического и индикационного обеспечения предоставляют ЛПР информационную модель внешней обстановки;
- нижний уровень управления, определяющий поиск способа достижения поставленной на верхнем уровне цели, анализ возможных путей достижения цели и выбор из них предпочтительного пути (принятие решения); решение задач обеспечивается, например, бортовой оперативно-советующей экспертной системой соответствующей ТС.

Исполнительный компонент реализует действие, соответствующее выбранному на нижнем уровне управляющей компоненты способу достижения поставленной цели. В результате обеспечивается воздействие на внешнюю и внутреннюю среду, которое сохраняет или видоизменяет сложившуюся ситуацию.

В соответствии с описанной моделью процесса функционирования будем относить такие системы к классу интеллектуальных систем управления с реализацией функции ситуационной осведомленности.

В качестве характерного примера таких систем могут рассматриваться интеллектуальные системы управления пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов с реализацией функции ситуационной осведомленности. В настоящее

время совершенно очевидно, что среди многих факторов, призванных обеспечить существенное повышение боевой эффективности многих типов летательных аппаратов нового поколения, одним из главенствующих является фактор реализации функции ситуационной осведомленности на всех участках полета этих аппаратов.

Для *пилотируемых* летательных аппаратов такая осведомленность реализуется совокупностью следующих трех составляющих так называемой "Общей ситуационной осведомленности":

- ▲ *наземная система* подготовки полета, обеспечивающая подготовку экипажей и борта самолетов к выполнению полетного задания на основе анализа априорной информации об ожидаемых мерах воздушного и наземного противодействия; выбор вариантов тактики выхода в район боевых действий, вариантов тактики противоборства с ожидаемым противником; подготовку полетных документов и исходных данных;
- ▲ *бортовая система* (1), обеспечивающая оценку состояния всего комплекса бортовой аппаратуры с использованием оперативно-советующей экспертной системы типовых ситуаций полета; экспертной системы оценки состояния бортовых измерительных и исполнительных устройств с выработкой рекомендаций экипажу по решению возникающих проблем и проверкой максимально точного исполнения принятых решений;
- ▲ *бортовая система* (2), обеспечивающая получение в любой момент времени полета максимально полной необходимой информации о складывающейся текущей ситуации во внешней среде за счет реализации возможности наблюдения и оценки состояния внешней среды, оценки достижимости целей управления и оперативного планирования маршрута движения самолета, тесно связанных с решением задач обнаружения и распознавания объектов этой среды, оценкой собственного движения и принятия последующих решений.

Применительно к *автономным беспилотным летательным аппаратам* (АБЛА) в "Общей ситуационной осведомленности" превалирует значимость таких составляющих, как *наземная система* подготовки пуска и *бортовая система* (2), обеспечивающая получение необходимой информации о состоянии внешней обстановки.

Следует отметить, что комплекс вопросов построения систем ситуационной осведомленности *пилотируемых* летательных аппаратов достаточно подробно рассмотрен в целом ряде работ [3—6]. В отношении АБЛА картина иная — рассмотрение вопросов построения систем ситуационной осведомленности даже на концептуальном уровне практически отсутствует. В настоящей статье предпринята попытка рассмотрения основополагающих принципов построения таких систем

с иллюстрацией особенностей, присущих АБЛА. При решении информационно-управляющих задач в этом случае бортовое интеллектуальное системообразующее ядро базируется на использовании технологии "технического зрения".

Структуру системы управления АБЛА представим, условно, в виде двух взаимосвязанных компонентов: "штатного", реализующего набор присущих беспилотному летательному аппарату типовых информационно-управляющих задач на всех участках его полета, и "интеллектуального", реализующего задачу ситуационной осведомленности на конечном участке его полета. В настоящей статье рассматривается возможная структура "интеллектуального" компонента системы управления ударного АБЛА большой дальности действия на конечном участке его полета, реализующего комплекс информационных и управленческих задач в части осуществления функции ситуационной осведомленности, обеспечивающего выполнение поставленной целевой функции (генеральной задачи полета) — поражение одного из заданных объектов многообъектной сцены. Такой компонент включает:

- "интеллектуальную" составляющую *наземной системы* подготовки полета, которая формирует на основе имеющейся и прогнозируемой априорной информации о состоянии внешней среды составную часть полетного задания летательного аппарата;
- "интеллектуальную" составляющую *бортовой системы управления* летательного аппарата (систему "технического зрения"), обеспечивающую получение на заключительном участке полета апостериорной информации о складывающейся реальной текущей ситуации во внешней среде, сопоставление априорной и апостериорной информации, принятие решений, формирование и реализацию соответствующего управления. Ограниченность рассмотрения только конечным участком полета ЛА в данном случае вызвана ограниченными дальностями действия систем "технического зрения" с бортовыми электронно-оптическими датчиками.

Постановка задачи

Под ситуационной осведомленностью в рассматриваемом классе задач понимается осведомленность о структурном составе наблюдаемой в процессе полета АБЛА сцены и его изменчивости относительно прогнозируемого состава, заданного в полетном задании.

Рассматриваются присущие системам данного класса принципиальные структурные и функциональные особенности "интеллектуальной" составляющей наземной и бортовой систем, такие как:

- априорное задание ТС, соответствующих выделенным объектам интереса (ОИ) в составе

рассматриваемой наземной сцены; задание набора проблемных субситуаций (ПрСС), выделенных для каждой ТС;

- формирование структуры и алгоритмического содержимого априорной базы знаний (АБЗ) как основного компонента полетного задания (ПЗ);
- формирование структуры бортовой системы "технического зрения", реализующей алгоритмы автоматического получения и обработки апостериорной информации о текущем состоянии рассматриваемой наземной сцены и ее ОИ, отнесение этой информации к соответствующим ТС и ПрСС, алгоритмы селекции или распознавания приоритетных ОИ путем сопоставления текущего изображения (ТИ) и эталонного изображения (эталонного описания) (ЭИ), принятия решения и управления полетом АБЛА.

Указанная выше АБЗ включает в себя:

- ▲ ситуационную базу знаний, содержащую описание и характеристики выделенных ОИ, приоритетное ранжирование выделенных ОИ, набор проблемных субситуаций (ПрСС);
- ▲ информационную базу знаний, содержащую ЭИ выделенных ОИ;
- ▲ алгоритмическую базу знаний, содержащую бортовые алгоритмы принятия решений и управления полетом АБЛА для всех ПрСС, а также циклограммы процессов реализации указанных алгоритмов.

Наземная система подготовки полетного задания

Принципиальная особенность наземной системы подготовки полетного задания для АБЛА состоит в необходимости решения ряда проблем, связанных с условием их полной автономности (принцип "пустил—забыл"). Возможная разрешимость этих проблем, главным образом, основывается на максимальном использовании априорной информации, представимой в виде баз знаний: ситуационной, информационной, характеризующей текущее состояние внешней среды, и алгоритмической. Структурная схема этих баз знания представлена на рис. 2.

Рассмотрим несколько подробнее упомянутые выше проблемы.

Первая из проблем заключается в необходимости проведения априорного ситуационного анализа условий применения АБЛА и разработки на этой основе бортовых алгоритмов обработки текущей информации, принятия решений и управления. Ситуационный анализ включает в себя решение следующих задач:

- ▲ выбор и анализ заданной заказчиком наземной сцены (определение размеров и информативности сцены, числа объектов в составе

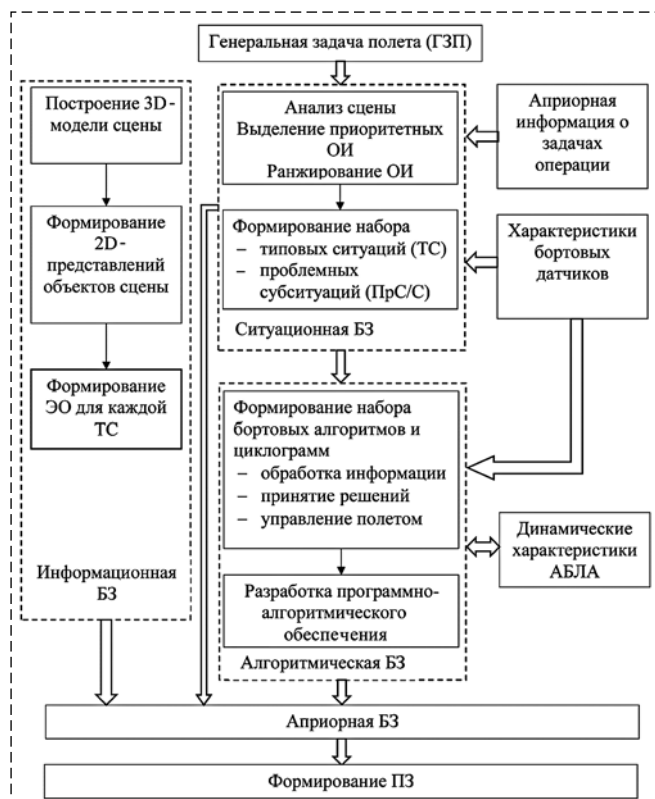


Рис. 2. Структура априорной базы знаний

сцены и их взаимного расположения), выделение представляющих интерес областей и ОИ, ранжирование ОИ по критерию их функциональной значимости (формирование иерархии приоритетов для ОИ — $OI_1, OI_2, \dots, OI_N$; определение геометрических размеров приоритетных ОИ и их взаимного расположения, определение "точек прицеливания" на поверхности этих объектов и возможных ракурсов полета), выделение жизненно важных элементов приоритетных ОИ в тех случаях, когда один ОИ имеет несколько уязвимых точек;

- ▲ формирование семантической сети из N возможных ТС на завершающем участке полета (реализация каждой ТС соответствует процессу наведения на соответствующий приоритетный объект OI_n или на один из его жизненно важных элементов), последующее формирование семантической сети из набора M_n возможных ПрСС, каждая из которых основывается на описании предполагаемого состояния наблюдаемой сцены. Для каждой n -й ТС возможны M_n ПрСС;
- ▲ разработка набора бортовых алгоритмов формализации для всех рассматриваемых ПрСС.

При решении указанных задач используется информация о характеристиках бортовых информационных устройств АБЛА и его динамических характеристиках, играющих роль ограничений.

Результаты проведенного априорного ситуационного анализа условий применения АБЛА

определяют структуру и составляют основное содержание ситуационной базы знаний. Основные решения в этом направлении формируются в процессе совместной работы заказчика и разработчика системы управления АБЛА.

Особое место в рассмотренной проблеме занимает задача априорного формирования семантической сети из возможных ПрСС. Рассмотрению основных подходов к решению этой задачи посвящен отдельный раздел.

Вторая проблема заключается в необходимости формирования набора априорных ЭИ для приоритетных ОИ с последующим выбором одного из таких ЭИ и его сопоставления с апостериорным ТИ, получаемым в бортовой системе "технического зрения" в процессе полета в данный момент времени.

В процессе формирования априорного ЭИ решаются следующие задачи:

- ▲ построение трехмерной (3D) геометрической модели выбранной сцены с ее объектовым составом с учетом значений ошибок определения характеристик указанной модели;
- ▲ синтез двухмерного (2D) ЭИ выделенных приоритетных ОИ и их жизненно важных элементов с реализацией алгоритмов проективных преобразований, удаления невидимых линий и т.п., с использованием заданных координат точек визирования сцены, связанных с объектами, учетом ошибок ракурса и направления оптической оси бортового датчика ТИ на рубеже начала конечного наведения;
- ▲ формирование базы знаний ЭИ выделенных приоритетных ОИ для всего рассмотренного набора ТС и ПрСС, синтезирование "раскраски" этих моделей для различных спектральных диапазонов, выделение стабильных признаков в соответствии с принятыми алгоритмами бортовой системы "технического зрения".

Очевидно, что для каждого ОИ формируется свой набор ЭИ, соответствующий возможным значениям ракурса и масштаба получаемого ТИ.

Результаты решения указанных выше задач и разработки на этой основе бортовых алгоритмов принятия решений и управления, а также соответствующего программно-алгоритмического обеспечения составляют основное содержание алгоритмической базы знаний.

Ситуационная база знаний

В основу априорного ситуационного анализа условий применения АБЛА положена формальная модель предметной области, определяющая структуру и состав ситуационной базы знаний, в которой генеральная задача полета представляется через априорно сформированные семантические сети ТС, прогнозируемые ПрСС для каждой ТС, методы разрешения этих ситуаций.

Остановимся подробнее на некоторых положениях построения указанной модели предметной области и соответствующей ситуационной базы знаний. Как уже отмечалось, на рассматриваемом участке полета семантическая сеть возможных ТС представима набором N ситуаций, реализация каждой из которых соответствует процессу наведения на соответствующий приоритетный ОИ. В каждом таком процессе выделяется множество значимых событий (ЗС). Набор таких ЗС формирует ситуационный вектор V_c , характеризующий ПрСС. Компоненты ситуационного вектора характеризуют состояние внешней среды, пространственно-временное расположение АБЛА относительно ОИ и т.п., а также формируют циклограмму возможного наступления ЗС.

Каждое ЗС требует либо немедленного разрешения, либо предварительного пространственно-временного прогноза его наступления. При отсутствии соответствия результатов действия и прогноза принимается другое решение и реализуется новое управляющее воздействие. В случае, когда соответствия достичь невозможно, происходит изменение задачи, выполняемой интеллектуальной системой. Если результаты действия соответствуют прогнозу, что говорит об удачно выбранном управлении, то задача интеллектуальной системой считается выполненной.

Для каждой из ПрСС необходимо построение соответствующей базы знаний, представленной совокупностью математических моделей двух типов.

В моделях первого типа формируется ситуационный вектор V_{c1} , выполняющий операцию назначения или идентификации текущей ПрСС. Механизм такого назначения (выбора текущей ПрСС из существующего множества) обычно реализуется на базе продукционных правил ситуационного управления вида "если, ..., то, ..., иначе" [4, 7] и отрабатывается при ситуационном моделировании.

Модели второго типа (модели механизмов разрешения текущих ПрСС) формируют ситуационный вектор V_{c2} и позволяют осуществить операции генерирования и ранжирования множества допустимых вариантов разрешения каждой ПрСС, выбор рационального варианта разрешения, оценить результаты воздействия выбранного варианта разрешения на саму ПрСС.

Механизмы разрешения в моделях второго типа могут быть представлены тремя возможными вариантами [8, 9]:

- ▲ механизм разрешения, аналогичный механизму назначения текущей ПрСС, отрабатываемый при ситуационном моделировании и решении оптимизационных задач;
- ▲ механизм разрешения, построенный на базе алгоритмов многокритериального выбора альтернатив в случаях невозможности или затруднительности адекватной математической

формализации оптимизационных задач для тех или иных ПрСС;

- ▲ механизм разрешения, основанный на прецедентах успешного разрешения ПрСС, формальное описание которого включает ситуационный вектор V_{c2} [проблема, прецеденты ее разрешения] и матрицу знаний (предыдущий успешный опыт использования прецедента).

По сути, совокупность рассмотренных моделей представляет собой сценарий соответствующей ТС. Детальная разработка таких сценариев требует проведения предварительных исследований с использованием ряда математических моделей, формулируемых в классе математических задач оптимального управления, теории игр, теории принятия решений. Полученные в результате таких исследований или найденные при имитационном моделировании рациональные методы разрешения ПрСС закладываются в математические модели, которые являются компонентами ситуационной базы знаний.

Бортовая система "технического зрения"

Как уже отмечалось, бортовое интеллектуальное системообразующее ядро системы управления АБЛА базируется на использовании технологии "технического зрения". Такая "интеллектуальная" составляющая *бортовой системы управления* обеспечивает получение апостериорной информации о складывающейся реальной текущей ситуации во внешней среде, обработку и сопоставление априорной и апостериорной информации, принятие решений, формирование и реализацию соответствующего управления (рис. 3). Решение этих задач базируется на использовании следующих методов и алгоритмов:

- эталонно-ориентированные методы и алгоритмы обнаружения, распознавания и селекции объектов в составе сцены и определения их координат;
- алгоритмы анализа состояний наблюдаемых многообъектных сцен и их временной и структурной изменчивости для решения задачи ситуационной осведомленности в процессе полета.

Детальному рассмотрению многих вопросов "технического зрения" как в общей постановке, так и применительно к беспилотным летательным аппаратам посвящено достаточно большое число публикаций [10—13]. В данной статье представляется целесообразным осветить лишь основные положения в этом направлении, способствующие лучшему пониманию всей поставленной проблемы в целом.

В настоящее время в большинстве работ по формированию СТЗ выделяются шесть основных операций обработки информации: полу-



Рис. 3. Функциональная схема "интеллектуальной" составляющей бортовой системы технического зрения

чение (формирование) исходной информации; предварительная обработка; сегментация; описание; распознавание и селекция; анализ и интерпретация сцены и объектов.

Для АБЛА в качестве датчиков исходной информации возможно использование широкой номенклатуры активных, пассивных и комбинированных датчиков различных спектральных диапазонов, представляющих эту информацию в виде цифровых изображений наблюдаемых наземных сцен (ТИ). На наш взгляд, в рассматриваемых случаях существенными преимуществами обладают пассивные и активно-пассивные датчики телевизионного, тепловизионного, лазерного и радиолокационного типов и их комбинации.

На этапе предварительной обработки осуществляется операция реконструкции ТИ наблюдаемой сцены в целях максимально возможного устранения или компенсации искажающих это изображение факторов и улучшения отдельных характеристик изображения.

Далее осуществляются операции сегментации сформированного и прошедшего предварительную обработку изображения для выделения его геометрической структуры и оценки параметров сегментов и объектов. Оценка параметров объектов состоит в определении таких характеристик, как координаты центра объекта, его размеры; значение средней яркости и т.п. для сегментов; форма, размеры, координаты прицельной точки для объектов и т.д.

Наиболее эффективным при решении проблемы распознавания или селекции объектов на сцене в рассматриваемой постановке представляется подход, основанный на выделении в изображении сцены неких характерных структурных признаков, присущих обнаруживаемому объекту.

Реализации процедур распознавания и селекции заданных объектов сцены путем сопоставления ТИ и ЭИ предшествует операция унифицированного описания указанных изображений. Если при различных способах описания выбран, например, признаковый способ на основе геометрического контекста, тогда в качестве основных признаков изображений объектов и сцены в целом применяются геометрические характеристики — форма, размеры и параметры взаимного расположения объектов сцены. При наличии имеющейся априорной информации о сцене, расчетных значениях координат точки визирования сцены, параметрах бортового датчика ТИ, статистических характеристик ошибок навигационной системы и другой информации формируются реберные описания объектов сцены как для ТИ, так и для ЭИ.

Решение указанных операций позволяет реализовать в системе наведения такие режимы функционирования, как:

- автоматическое обнаружение и распознавание, осуществляющее выбор и формирование признакового пространства; определение качественных и количественных признаков ОИ, выбранных для локализации на множестве других объектов сцены; локализация ОИ путем сопоставления признаков ТИ и ЭИ;
- селекция ОИ, обеспечивающая выделение заданных объектов сцены, оценку их характеристик, взаимного влияния, структурных соотношений;
- автоматическое сопровождение ОИ, обеспечивающее автоматическое позиционирование изображения распознанного объекта, как правило, в центре кадра;
- адаптация к объектам и условиям наблюдения, реализуемая структурными, алгоритмическими и параметрическими методами.

Пример реализации режима ситуационной осведомленности

Рассмотрим в качестве иллюстрации пример процесса априорного ситуационного анализа условий применения АБЛА, направленного на выполнение поставленной целевой функции (генеральной задачи полета) — успешное наведение на ОИ, применительно к заданной многообъектной наземной сцене с двумя выделенными ранжированными приоритетными ОИ₁ и ОИ₂ (рис. 4).

В этом случае семантическая сеть типовых ситуаций состоит из двух ТС, что соответствует

процессам наведения на приоритетные объекты $OИ_1$, $OИ_2$, с бльшим приоритетом у $OИ_1$ относительно $OИ_2$. При формировании семантической сети возможных ПрСС ограничимся рассмотрением трех субситуаций для $ТС_1$ (ПрСС₁₁, ПрСС₁₂, ПрСС₁₃) и двух субситуаций для $ТС_2$ (ПрСС₂₁, ПрСС₂₂). Напомним, что в том и другом случае в процессе наведения выделяется множество ЗС,

определяющих соответствующие ПрСС. Состояние каждой ПрСС описывается ситуационными векторами V_{c1} и V_{c2} , осуществляющими операции назначения ситуации и ее разрешения соответственно. В нашем случае выбор пространственно-временных координат этих векторов определяется конечным ЗС — успешной реализацией генеральной задачи полета. Наступление такого

события зависит, в свою очередь, от возможности выполнения операций распознавания/селекции $OИ_1$ или альтернативного $OИ_2$ с последующим автосопровождением его в течение всего процесса наведения.

Далее приведен перечень ЗС, возникающих в ходе решения задачи наведения АБЛА на приоритетный $OИ_1$ с возможностью перенацеливания на альтернативный $OИ_2$. Данный перечень ограничен заданными рамками статьи.

ЗС1 — выход на рубеж конечного наведения с некоторой суммарной погрешностью Δ_0 угловой ориентации АБЛА относительно $OИ$, меньшей заданного порога Δ_n ; данная погрешность определяется навигационными погрешностями на предыдущем участке полета АБЛА, погрешностями заданного в ПЗ значения ракурса на этом рубеже, погрешностями определения в ПЗ геодезических координат заданного $OИ$.

ЗС2 — выбор ЭИ в зависимости от $OИ$ и Δ_0 ; ЗС2(1) соответствует $OИ_1$ и варианту $\Delta_0 \leq \Delta_n$ ($ЭИ_{11}$); ЗС2(2) соответствует $OИ_1$ и варианту $\Delta_0 > \Delta_n$ ($ЭИ_{12}$).

ЗС3 — реализация начального обнаружения, распознавания, селекции заданного $OИ$ с использованием выбранного ЭИ.

ЗС4 — определение прицельной точки; начало режима автосопровождения.

ЗС5 — потеря автосопровождения на данном такте.

ЗС6 — определение интервала отсутствия автосопровождения.

ЗС7 — срыв автосопровождения (интервал автосопровождения больше заданного).

ЗС8 — продолжение автосопровождения.

ЗС9 — решение о наведении с помощью "штатной" автономной системы до получения конечного результата; используются данные, полученные на момент срыва автосопровождения.

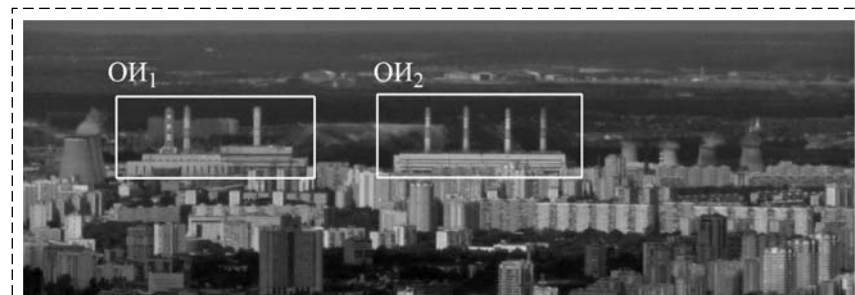


Рис. 4. Многообъектная наземная сцена с двумя выделенными приоритетными $OИ$

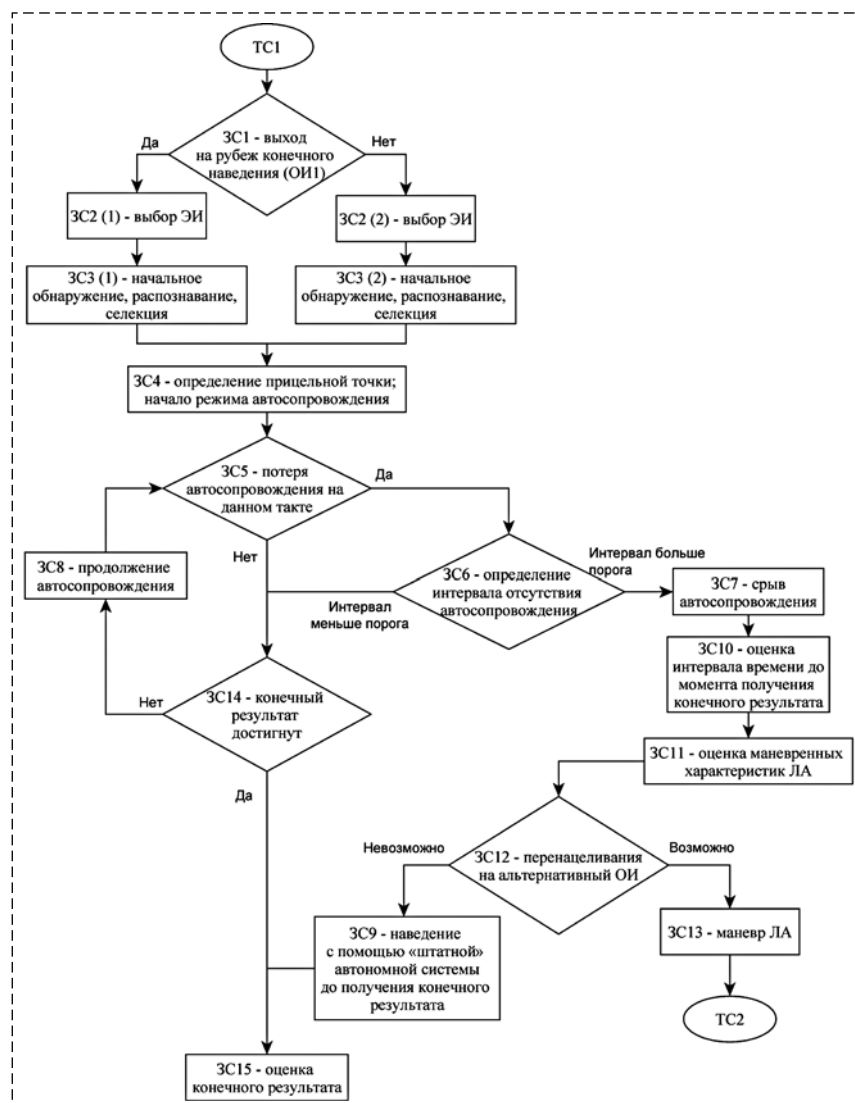


Рис. 5. Алгоритм процесса априорного ситуационного анализа условий применения АБЛА

ЗС10 — оценка интервала времени между моментом срыва автосопровождения и моментом получения конечного результата.

ЗС11 — оценка маневренных характеристик ЛА, определяющих возможность перенацеливания на альтернативный ОИ.

ЗС12 — принятие решения о возможности перенацеливания на альтернативный ОИ.

ЗС13 — маневр ЛА, выход на заданный в ПЗ рубеж конечного наведения на альтернативный ОИ.

ЗС14 — получение конечного результата.

ЗС15 — оценка конечного результата.

Порядок возникновения перечисленных ЗС проиллюстрирован в виде блок-схемы, приведенной на рис. 5.

Заключение

В статье представлена концепция построения интеллектуальной системы управления перспективными АБЛА с реализацией функции ситуационной осведомленности. Под ситуационной осведомленностью понимается осведомленность о структурном составе наблюдаемой в процессе полета наземной сцены и его изменчивости относительно прогнозируемого состава, заданного в ПЗ. Предложено рассматривать наземную систему подготовки ПЗ и бортовую систему управления АБЛА в виде двух компонентов: штатного и интеллектуального. При решении информационно-управляющих задач в этом случае интеллектуальное ядро системы управления базируется:

- на "интеллектуальной" составляющей наземной системы подготовки полета в виде априорной базы знаний (информационной, ситуационной и алгоритмической составляющих). Данная база знаний формируется на основе априорной информации о состоянии внешней среды, набора прогнозируемых ситуаций и методов их разрешения;
- на "интеллектуальной" составляющей бортовой системы управления (система технического зрения), обеспечивающей получение в процессе полета апостериорной информации о реальной текущей ситуации во внешней среде, сопоставление априорной и апостериорной информации, принятие решений, формирование и реализацию соответствующего управления.

При формировании ситуационной и алгоритмической составляющих априорной базы знаний используется следующая модель данных: семантическая сеть возможных ТС представима набором N ситуаций, реализация каждой из которых соответствует процессу наведения на соответствующий приоритетный ОИ; в каждом таком процессе выделяется множество ЗС; набор таких ЗС формирует ситуационный вектор V_c , характеризующий ПрСС. Компоненты ситуационного вектора характеризуют состояние внешней сре-

ды, пространственно-временное расположение АБЛА относительно ОИ и т.п., а также формируют циклограмму возможного наступления ЗС.

Бортовая система технического зрения осуществляет операции распознавания, селекции и автосопровождения приоритетного объекта, назначенного в процессе подготовки полетного задания. В реальной обстановке возможны ситуации, когда приоритетный объект отсутствует. В этом случае бортовая система принимает решение о перенацеливании на альтернативный объект.

В рассмотренном примере приведена методика формирования ситуационной и алгоритмической составляющих априорной базы знаний для случая двух объектов в составе многообъектной стационарной наземной сцены.

Список литературы

1. **Endsley M. R.** Situation awareness in an advanced strategic mission (No. NOR DOC 89—32). Hawthorne, CA: Northrop Corporation, 1989.
2. **Endsley M. R., Bolte B., Jones D. G.** Designing for situation awareness: An approach to user-centered design. Taylor & Francis, London, 2003.
3. **Желтов С. Ю., Федун Б. Е.** Оперативное целеполагание в антропоцентрических объектах с позиции концептуальной модели "Этап". Структуры алгоритмов поддержки процесса решения задачи экипажем // Известия РАН. Теория и системы управления. 2015. № 3. С. 57—71.
4. **Федун Б. Е., Шестопалов Е. В.** Оболочка бортовой оперативно советующей экспертной системы для типовой ситуации полета "Ввод группы в воздушный бой" // Известия РАН. Теория и системы управления. 2010. № 3. С. 88—105.
5. **Грибков В. Ф., Федун Б. Е.** Бортовая информационная интеллектуальная система "Ситуационная осведомленность экипажа" для боевых самолетов // Интеллектуальные системы управления / Под ред. акад. РАН С. Н. Васильева. М.: Машиностроение, 2010. С. 108—116.
6. **Федун Б. Е.** Базовая алгоритмическая оболочка бортовых оперативно советующих экспертных систем типовых ситуаций функционирования объекта // Известия РАН. Теория и системы управления. 2009. № 5. С. 90—101.
7. **Васильев С. Н., Жерлов А. К., Федосов Е. А., Федун Б. Е.** Интеллектуальное управление динамическими системами. М.: Физматлит. 2002.
8. **Саати Т., Кернс К.** Аналитическое планирование. Организация систем. М.: Радио и связь, 1991.
9. **Лохин В. М., Захаров В. Н.** Интеллектуальные системы управления: понятия, определения, принципы построения // Интеллектуальные системы автоматического управления / Под ред. И. М. Макарова, В. М. Лохина. М.: Физматлит, 2001. 576 с.
10. **Pratt W. K.** Digital Image Processing (Fourth edition), Wiley, 2007. 807 p.
11. **Визильер Ю. В., Желтов С. Ю., Бондаренко А. В.** и др. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения. М.: Физматкнига, 2010. 672 с.
12. **Гнилицкий В. В., Инсаров В. В.** Обнаружение и локализация объектов на изображениях трехмерных наземных сцен // Известия РАН. Теория и системы управления. 2011. № 6. С. 79—93.
13. **Инсаров В. В., Тихонова С. В., Михайлов И. И.** Проблемы построения систем технического зрения, использующих комплексирование информационных каналов различных спектральных диапазонов // Информационные технологии. Приложение. 2014. № 3.

The Concept of Building Intelligent Control Systems for Autonomous Unmanned Aerial Vehicles with the Realization of the Function of Situational Awareness

W. V. Insarov, wiliam@gosniias.ru✉, S. V. Tikhonova, svetico@yandex.ru,
S. A. Dronsky, sergey.dronsky@gosniias.ru, Federal State Unitary Enterprise
"State Research Institute of Aviation Systems", Moscow, 125319, Russian Federation

Corresponding author: Insarov Wiljam V., D. Sc., Professor, Deputy Head of Unit,
Federal State Unitary Enterprise "State Research Institute of Aviation Systems"
State Scientific Centre of Russian Federation, Moscow, 125319, Russian Federation, e-mail: wiliam@gosniias.ru

Accepted on November 11, 2017

We consider a situational awareness as the perception of environmental elements and events, the comprehension of their meaning, and the projection of their status after some variable has changed. Applied to perspective autonomous unmanned aerial vehicles (AUAV) the situational awareness is understood as awareness of terrestrial scene structure and its variability in relation to information about this structure preassigned in the flight task (FT) which preparation is performed on the ground. In this case, ground system of FT preparation and onboard control system could be represented as two components: conventional and intellectual. The intellectual component of a control system is based on:

— "intellectual" component of ground system of FT preparation that includes aprioristic knowledge base (informational, situational and algorithmic components); this knowledge base is formed on the base of aprioristic information about a condition of the external environment, a set of the predicted situations and their resolution methods;

— "intellectual" component of the onboard control system (technical vision system) providing a posteriori information about a current state of external environment, comparison of a priori and a posteriori information, decision-making methods, formation and implementation of the relevant control.

When developing situational and algorithmic components of the aprioristic knowledge base the following logical sequence is used:

— FT is represented through a priori formed semantic networks of the typical situations (TS); one of examples of TS is process of targeting the relevant priority object of interest (OI);

— each TS is formed of big number of significant events (SE); these SE forms sets (situational vectors V_s), that characterizes the problem sub-situation (PrSS).

"Intellectual" component of the onboard control system (technical vision system) performs such tasks as recognition, selection and auto tracking of the priority OI assigned during the preparation of the FT. In a real situation, the priority OI could be unavailable (destroyed, invisible because of weather condition, etc.). In this case, the on-board system decides to retarget to an alternative OI. The example is offered where a method is given for the developing of the situational and algorithmic components of the a priori knowledge base for the case of two OI that are part of a multi-object stationary terrestrial scene.

Keywords: situational awareness; unmanned aerial vehicles; autonomous control systems; intelligent systems; onboard technical vision systems

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Federation for Basic Research, project No. 17-08-00584a.

For citation:

Insarov W. V., Tikhonova S. V., Dronsky S. A. The Concept of Building Intelligent Control Systems for Autonomous Unmanned Aerial Vehicles with the Realization of the Function of Situational Awareness, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 2, pp. 111–119.

DOI: 10.17587/mau.19.111-119

References

1. Endsley M. R. Situation awareness in an advanced strategic mission (No. NOR DOC 89–32). Hawthorne, CA, Northrop Corporation, 1989.
2. Endsley M. R., Bolte B., Jones D. G. Designing for situation awareness: An approach to user-centered design, Taylor & Francis, London, 2003.
3. Zheltov S. Y., Fedunov B. E. Operational goal setting in anthropocentric objects from the viewpoint of the conceptual model called Etap: I. Structures of algorithms for the support of crew decision-making. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2015, vol. 54, no. 3, pp. 384–398 (in Russian).
4. Fedunov B. E., Shestopalov E. V. A shell of an onboard online advisory expert system for typical flight situation "introduction of a group into an air fight". *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2010, vol. 49, no. 3, pp. 426–443 (in Russian).
5. Gribov V. F., Fedunov B. E. Bortovaya informatsionnaya intellektual'naya sistema "Situatsionnaya osvedomlennost' ekipazha" dlya boevykh samoletov. V sb. *Intellektual'nye sistemy upravleniya*

(On-board information intelligence system "Situational awareness of the crew" for combat aircraft. In the book "Intelligent Control Systems"), Moscow, Mashinostroenie, 2010, pp. 108–116 (in Russian).

6. Fedunov B. E. Basic algorithmic shell of onboard real-time advisory expert systems for operation situations typical for an object. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2009, vol. 48, no. 5, pp. 752–764 (in Russian).
7. Vassilyev S. N., Zherlov A. K., Fedosov E. A., Fedunov B. E. *Intellektnoe upravlenie dinamicheskimi sistemami*, Moscow, Fizmatlit (in Russian).

8. Saati T., Kerns K. *Analiticheskoe planirovanie. Organizatsiya system* (Analytical planning. Organization of systems), Moscow, Radio i svyaz', 1991 (in Russian).
9. Lokhin V. M., Zakharov V. N. *Intellektual'nye sistemy upravleniya: ponyatiya, opredeleniya, printsipy postroeniya. V kn.: Intellektual'nye sistemy avtomaticheskogo upravleniya* (Intelligent control systems: concepts, definitions, principles of construction. In: Intelligent automatic control systems), Moscow, Fizmatlit, 2001, 576 p. (in Russian).

10. Pratt W. K. *Digital Image Processing*, Wiley, 2007, 807 p.
11. Vizil'ter Yu. V., Zheltov S. Yu., Bondarenko A. V. i dr. *Obrabotka i analiz izobrazhenii v zadachakh mashinnogo zreniya* (Image processing and analysis in computer vision problems), Moscow, Fizmatkniga, 2010, 672 p. (in Russian).
12. Gnilit'skii V. V., Insarov V. V. *Obnaruzhenie i lokalizatsiya ob'ektov na izobrazheniyakh trekhmernykh nazemnykh stsien* (Detection and Localization of Objects in images of 3D ground scenes), *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2011, vol. 50, no. 6, pp. 933–941 (in Russian).

13. Insarov V. V., Tikhonova S. V., Mikhaylov I. I. *Application to Journal "Information Technologies"*, 2014, no. 3 (in Russian).

Р. А. Мунасыпов, д-р техн. наук, проф., rust40@mail.ru,

Т. З. Муслимов, аспирант, tagir.muslimov@gmail.com,

Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ)

Групповое управление беспилотными летательными аппаратами на основе метода пространства относительных состояний

Решена задача группового управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) самолетного типа с помощью метода пространства относительных состояний. При использовании данного многоагентного подхода строй БПЛА становится децентрализованной градиентной динамической системой, и функциональный порядок системы генерируется в результате взаимодействия ее агентов. Решение было проверено в среде MATLAB/Simulink с использованием реалистичных нелинейных динамических моделей летательных аппаратов.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, полет строем, групповое управление БПЛА, многоагентная система, градиентная динамическая система

Введение

Одним из перспективных направлений применения автономных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является групповое управление. Полет строем, т.е. точное выдерживание некоторых заданных относительных положений в процессе полета группы, не только улучшает эффективность выполнения некоторых видов миссий, но и для целого ряда задач становится необходимым условием их решения. В качестве примеров можно привести локализацию радара [1], преодоление ПВО противника с помощью ложных целей, построение антенных решеток из БПЛА [2, 3], измерение профилей ветра для метеорологических исследований [4], автоматическую дозаправку в воздухе [5], увеличение полезной нагрузки или дальности за счет снижения индуктивного сопротивления в случае полета плотным строем [6] и др.

Существуют несколько подходов к решению проблемы формирования строя БПЛА. В некоторых работах алгоритмы управления были разработаны для квадрокоптеров [7, 8]. Для БПЛА самолетного типа наиболее распространенными являются подход "ведущий—ведомые" [9, 10] и подход на основе виртуальных структур [11]. В качестве недостатков метода "ведущий—ведомые" можно назвать отсутствие обратной связи от ведомых аппаратов, а также централизованность системы, заключающуюся в том, что выход из строя ведущего БПЛА ведет к потере формы строя. Подход на основе виртуальных структур в первоначальном варианте также не предполагает обратной связи от объектов управления и, кроме того, в значительной

степени чувствителен к внешним возмущениям (например, ветровым), вследствие чего теряется точность выдерживания строя. В работе [12] предлагается подход на основе применения методов теории оптимального управления, однако он обладает относительно высокой вычислительной сложностью и поэтому может не подойти для использования на малых БПЛА.

В данной статье для формирования трехмерного строя БПЛА используется метод пространства относительных состояний — децентрализованное управление многоагентной системой, отказоустойчивое в том смысле, что выход из строя отдельных агентов не ведет ни к выходу из строя всей системы, ни к неосуществимости дальнейшего построения и выдерживания формации. При этом каждый агент обладает автономностью, т.е. способностью контролировать часть глобального состояния системы. Данный метод является биоинспирированным алгоритмом, основанным на модели работы сети двигательных нейронов живых организмов, и не обладает большой вычислительной сложностью.

Математическая модель динамики полета БПЛА

Для динамической модели БПЛА используются две системы координат: инерциальная "на север — на восток — вниз" (NED) с индексом $\cdot^n$ и связанная система координат с индексом $\cdot^b$.

Координаты БПЛА задаются следующим образом:

$$\mathbf{p}^n = (p_n \ p_e \ p_d)^T,$$

где p_n — северная координата (широта) положения БПЛА в инерциальной системе координат; p_e — восточная координата (долгота) положения БПЛА в инерциальной системе координат; p_d — координата БПЛА по оси, направленной к центру Земли в инерциальной системе координат.

Ориентация БПЛА задается с помощью углов Эйлера:

$$\Theta = (\phi \quad \theta \quad \psi)^T,$$

где ϕ — угол крена; θ — угол тангажа; ψ — угол рыскания.

Компоненты скорости БПЛА в связанной системе координат:

$$\mathbf{v}^b = (u \quad v \quad w)^T,$$

где u — компонента скорости вдоль оси, направленной к носу аппарата; v — компонента скорости вдоль оси, направленной вдоль правого крыла аппарата; w — компонента скорости вдоль оси, направленной от верха к низу аппарата.

Угловые скорости

$$\omega^b = (p \quad q \quad r)^T$$

рассматриваются в связанной системе координат.

Вектор входных воздействий имеет вид

$$\mathbf{u} = (\delta_e \quad \delta_a \quad \delta_r \quad \delta_t)^T,$$

где δ_e — отклонение руля высоты; δ_a — отклонение элеронов; δ_r — отклонение руля направления; δ_t — отклонение дроссельной заслонки.

Линеаризованные уравнения бокового движения БПЛА в пространстве состояний [13]:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} v \\ p \\ r \\ \phi \\ \psi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_v & Y_p & Y_r & g \cos \theta \cos \phi & 0 \\ L_v & L_p & L_r & 0 & 0 \\ N_v & N_p & N_r & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \cos \phi \tan \theta & q \cos \phi \tan \theta - r \sin \phi \tan \theta & 0 \\ 0 & 0 & \cos \phi \sec \theta & p \cos \phi \sec \theta - r \sin \phi \sec \theta & 0 \end{pmatrix} \times$$

$$\times \begin{pmatrix} v \\ p \\ r \\ \phi \\ \psi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Y_{\delta_a} & Y_{\delta_r} \\ L_{\delta_a} & L_{\delta_r} \\ N_{\delta_a} & N_{\delta_r} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_a \\ \delta_r \end{pmatrix}.$$

Линеаризованные уравнения продольного движения БПЛА в пространстве состояний:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} u \\ w \\ q \\ \theta \\ h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_u & X_w & X_q & -g \cos \theta & 0 \\ Z_u & Z_w & Z_q & -g \sin \theta & 0 \\ M_u & M_w & M_q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta & -\cos \theta & 0 & u \cos \theta + w \sin \theta & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ w \\ q \\ \theta \\ h \end{pmatrix} +$$

$$+ \begin{pmatrix} X_{\delta_e} & X_{\delta_t} \\ Z_{\delta_e} & 0 \\ M_{\delta_e} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_e \\ \delta_t \end{pmatrix}.$$

Метод пространства относительных состояний в задачах децентрализованного управления многоагентными системами

В статьях [14, 15] в соответствии с представлениями об осцилляторной нейронной сети живых организмов, формирующей двигательные сигналы локомоции, была предложена модель децентрализованной автономной динамической системы взаимодействующих агентов. На основе этого подхода определим группу автономных БПЛА как систему данного типа.

Будем рассматривать многоагентную автономную систему как граф, в котором каждый агент является вершиной графа, а взаимодействие — ребром (рис. 1).

Пусть n — число БПЛА; N — число взаимодействий между ними; $\xi = (\xi_1, \dots, \xi_n)^T$ — вектор текущих состояний; $\zeta = (\zeta_1, \dots, \zeta_N)^T$ — вектор

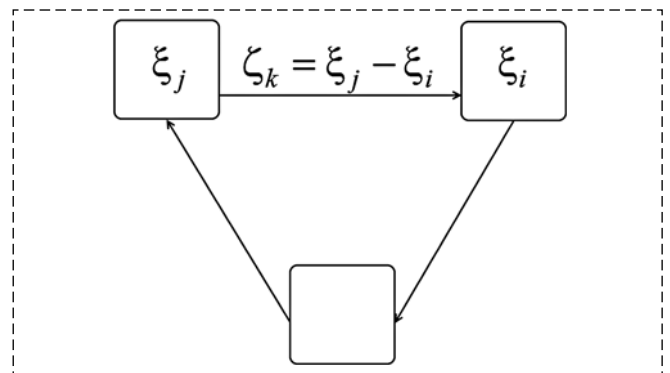


Рис. 1. Представление децентрализованной автономной динамической системы в виде графа

относительных состояний (рис. 1); $\mathbf{A}$ — матрица инцидентности графа. В этом случае их взаимосвязь определяется следующим образом:

$$\zeta = \mathbf{A}^T \xi. \quad (1)$$

Если данный граф является связным, то в соответствии с теорией графов вектор относительных состояний $\zeta = (\zeta_1, \dots, \zeta_N)^T$ становится порождающим вектором пространства размерностью $n - 1$ независимо от N , которое в дальнейшем будем называть пространством относительных состояний.

Пусть уравнение динамики i -го БПЛА имеет вид

$$\frac{d\xi_i}{dt} = f_i(\xi_i, \xi_{i_1}, \dots, \xi_{i_{m_i}}), \quad (2)$$

где $\xi_{i_1}, \dots, \xi_{i_{m_i}}$ — текущие состояния i_1 -го, ..., i_{m_i} -го агентов, которые непосредственно взаимодействуют с i -м, а f_i — дифференцируемая функция. Следовательно, согласно соотношениям (1) и (2) уравнение динамики относительных состояний можно представить в следующем виде:

$$\frac{d\zeta}{dt} = \mathbf{A}^T \mathbf{f}, \quad (3)$$

где $\mathbf{f} = (f_1, \dots, f_n)^T$. Тогда в соответствии с работой [14] выполняется следующая теорема.

Теорема. В пространстве относительных состояний существует потенциальная функция в том и только в том случае, если компоненты вектор-функции $\mathbf{f}$ определяются следующим образом:

$$f_i = \tilde{f}_i(\vartheta_i) + \bar{f},$$

где $\vartheta_i = \sum_{k=1}^{m_i} (\xi_{i_k} - \xi_i)$; ϑ_i — разница между суммой относительных состояний, для которых ребро графа входит в i -ю вершину графа (в этом случае $\xi_{i_k} - \xi_i = \vartheta_{i_k}$), и суммой относительных состояний, для которых ребро выходит из i -й вершины (в этом случае $\xi_{i_k} - \xi_i = -\vartheta_{i_k}$) (рис. 2); $\bar{f}$ — те

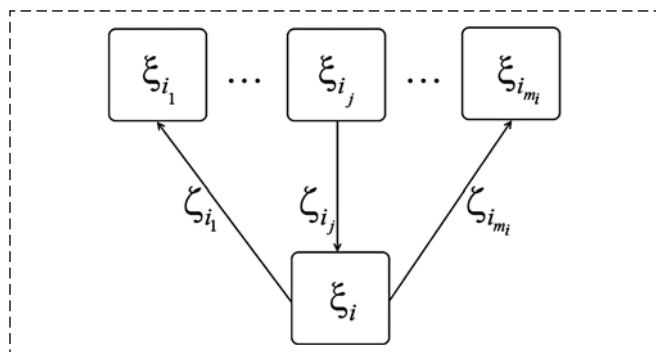


Рис. 2. Иллюстрация взаимодействий с i -м БПЛА

слагаемые в уравнениях динамики агентов (2), для которых выполняется следующее условие: $\frac{\partial f_1}{\partial \phi} = \frac{\partial f_2}{\partial \phi} = \dots = \frac{\partial f_n}{\partial \phi} \equiv \frac{\partial \bar{f}}{\partial \phi}$, где $\phi = \sum_{i=1}^n \xi_i$ — величина, характеризующая движение центра масс группы агентов. Тогда потенциальная функция в пространстве относительных состояний имеет вид

$$V(\zeta) = \sum_{i=1}^n \int \tilde{f}_i(\vartheta_i) d\vartheta_i.$$

Следует отметить, что поскольку $\mathbf{A}^T(\bar{f}, \dots, \bar{f})^T = 0$, то ни $\frac{d\zeta}{dt}$, ни $V(\zeta)$ не зависят от $\bar{f}$.

Таким образом, взаимодействие между подсистемами (агентами) генерирует упорядоченность самой системы и уравнение (3) является градиентной динамической системой, т.е. выполняется соотношение:

$$\frac{d\zeta}{dt} = -\left(\frac{dV(\zeta)}{d\zeta}\right)^T.$$

При этом финальное равновесие находится в глобальном минимуме потенциальной функции $V(\zeta)$ в пространстве относительных состояний. В случае изменения цели или окружающей обстановки данная потенциальная функция будет меняться, и взаимодействия между агентами изменятся соответствующим образом, что отражает построение нового функционального порядка. Кроме того, следует отметить, что система является децентрализованной — для формирования строя не требуется супервизор, так как каждый агент определяет собственное поведение для достижения конечной цели в зависимости от поведения взаимодействующих с ним агентов. Если один из агентов испытывает внешние возмущения, то остальные подстраиваются под него, сохраняя форму.

Алгоритм группового управления БПЛА методом пространства относительных состояний

Стратегию управления для i -го БПЛА относительно восточной оси инерциальной системы координат (ИСК) представим следующим образом:

$$\frac{dp_{e_i}}{dt} = \sum_{j \in J_i} \tau_{ij} (p_{e_j} - p_{e_i}) + u_{e_i}, \quad (4)$$

где p_{e_i} — восточная координата i -го БПЛА в ИСК; τ_{ij} — коэффициент взаимодействия между i -м и j -м агентом; J_i — множество БПЛА, взаимодействующих с i -м агентом; u_{e_i} — управляющее воздействие, испытываемое i -м БПЛА в проекции на восточную ось ИСК.

Аналогично задаются стратегии управления относительно северной оси координат и высоты над уровнем моря:

$$\frac{dp_{n_i}}{dt} = \sum_{j \in J_i} \tau_{ij} (p_{n_j} - p_{n_i}) + u_{n_i}, \quad (5)$$

$$\frac{dh_i}{dt} = \sum_{j \in J_i} \tau_{ij} (h_j - h_i) + u_{h_i}, \quad (6)$$

где p_{n_i} — северная координата i -го БПЛА в ИСК; $h_i = -p_d$ — высота i -го БПЛА над уровнем моря; u_{n_i} — управляющее воздействие, испытываемое i -м БПЛА в проекции на северную ось ИСК; u_{h_i} — управляющее воздействие, испытываемое i -м БПЛА в проекции на направление, противоположное оси, указывающей на центр Земли в ИСК.

Кинематические уравнения БПЛА представим следующим образом:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} p_n \\ p_e \\ h \end{pmatrix} = v_g \begin{pmatrix} \cos \chi \cos \gamma \\ \sin \chi \cos \gamma \\ \sin \gamma \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где v_g — скорость аппарата в ИСК; χ — угол курса между вектором скорости в ИСК и северной осью этой же системы координат; γ — угол наклона траектории между горизонтальной плоскостью и вектором скорости в ИСК.

Таким образом, в соответствии с уравнениями (4)–(7) угол курса χ_i , модуль воздушной скорости v_{a_i} и угол наклона траектории γ_i каждого БПЛА задаются следующим образом:

$$\begin{aligned} \chi_i &= \arctg \left(\frac{u_{n_i}}{u_{e_i}} \right); \\ v_{a_i} &= \sqrt{u_{n_i}^2 + u_{e_i}^2 + u_{h_i}^2}; \\ \gamma_i &= \arctg \frac{u_{h_i}}{\sqrt{u_{n_i}^2 + u_{e_i}^2}}. \end{aligned}$$

Вектор управляющих воздействий $\mathbf{U}_e = (u_{e_1}, \dots, u_{e_n})$ вдоль восточной оси ИСК находится из следующего соотношения:

$$\mathbf{U}_e = \mathbf{B}_e \mathbf{P}_e + \mathbf{D},$$

где $\mathbf{D} = -\mathbf{B}_e \mathbf{H}_e^{-1} (\mathbf{P}_{ed}^T, \hat{\mathbf{P}}_e)^T$ — вектор управления системой в пространстве относительных состояний; $\mathbf{H}_e$ — матрица, имеющая вид

$$\mathbf{H}_e = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{pmatrix}, \mathbf{q}_i = (\dots, 1, \dots, -1, \dots), i < n, \mathbf{q}_n = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}^T,$$

при этом $\mathbf{H}_e \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\mathbf{q}_i \in \mathbb{R}^{1 \times n}$, $\mathbf{P}_{ed}$ — вектор желаемых относительных положений вдоль восточной оси ИСК; $\hat{\mathbf{P}}_e = \sum_{k=1}^n p_{e_k}$ — сумма текущих восточных координат БПЛА в ИСК; $\mathbf{B}_e = (m_{ij} \tau_{ij}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ — матрица, получаемая из элементов m_{ij} матрицы взаимодействия $\mathbf{M}$, которая, в свою очередь, может быть представлена различными способами в зависимости от типа взаимодействия между агентами.

Например, для четырех БПЛА:

- в случае взаимодействия "каждый с каждым"

$$\mathbf{M}_1 = \begin{pmatrix} -3 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -3 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -3 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -3 \end{pmatrix};$$

- в случае взаимодействия "сосед с соседом"

$$\mathbf{M}_2 = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix};$$

- в случае взаимодействия "ведущий с ведомыми"

$$\mathbf{M}_3 = \begin{pmatrix} -3 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

Аналогичным образом находятся векторы управляющих воздействий $\mathbf{U}_n = (u_{n_1}, \dots, u_{n_n})$ вдоль северной оси ИСК и $\mathbf{U}_h = (u_{h_1}, \dots, u_{h_n})$ вдоль оси, указывающей на центр Земли.

Для проверки разработанных алгоритмов группового управления были проведены эксперименты с помощью программно-математического моделирования в среде MATLAB/Simulink. При этом были использованы модели динамики полета аппаратов "Zagi UAV", линеаризованные параметры продольного и бокового движений которых были рассчитаны в соответствии с методикой, представленной в работе [13].

На рис. 3 показаны построение и поддержание заданной геометрической формы четырьмя БПЛА, а также пронумерованные траектории каждого из них. Изначально геометрическая форма строя аппаратов представляет собой прямую линию. После отработки алгоритма строй принимает форму квадрата со строго заданной длиной стороны и поддерживается в ходе всего дальнейшего полета в таком виде.

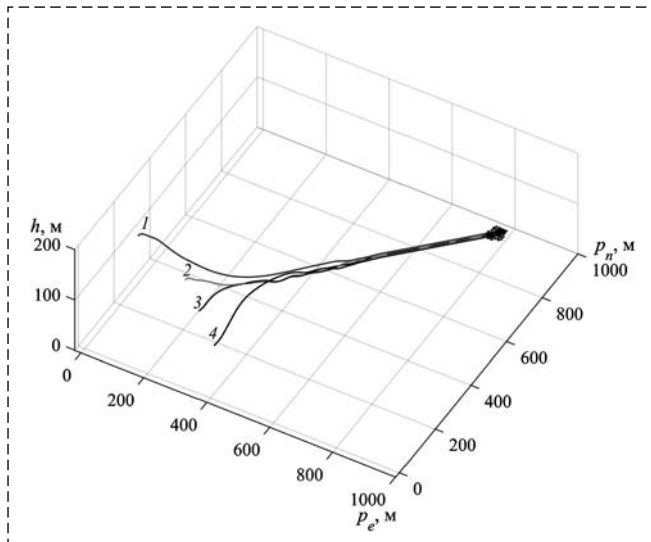


Рис. 3. Построение и поддержание заданной геометрической формы в полете

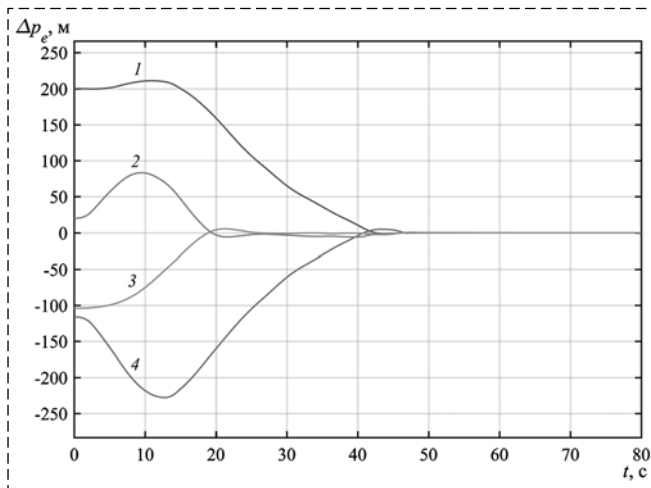


Рис. 4. Графики ошибки относительных положений БПЛА

На рис. 4 показаны графики зависимости ошибки относительных положений БПЛА вдоль восточной оси инерциальной системы координат (Δp_e) от времени для каждого из четырех аппаратов. Номера графиков соответствуют номерам траекторий на рис. 3.

Из рис. 4 видно, что графики переходных процессов достаточно гладкие, и выход строя БПЛА в заданную геометрическую форму происходит за приемлемое время.

Заключение

В статье представлено успешное применение метода пространства относительных состояний для решения задачи построения и выдерживания строя БПЛА самолетного типа. Дальнейшие

исследования будут сосредоточены на оптимизации времени формирования строя, учете предупреждения столкновений аппаратов в воздухе и создании основанных на вышеуказанном методе алгоритмов планирования пути.

Список литературы

1. Sundaram B., Palaniswami M., Reddy S., Sinickas M. Radar localization with multiple unmanned aerial vehicles using support vector regression // *Intelligent sensing and information processing*. 2005. P. 232–237.
2. Chandra R. S., Breheny S. H., D'Andrea R. Antenna array synthesis with clusters of unmanned aerial vehicles // *Automatica*. 2008. Vol. 44. P. 1976–1984.
3. Garza J., Panduro M. A., Reyna A., Romero G., del Rio C. Design of UAVs-based 3D antenna arrays for a maximum performance in terms of directivity and SLL // *International Journal of Antennas and Propagation*. 2016.
4. Coopmans C., Stark B., Jensen A., Chen Y. Q., McKee M. Cyber-physical systems enabled by small unmanned aerial vehicles. In: K. P. Valavanis, G. J. Vachtsevanos (Eds.), *Handbook of unmanned aerial vehicles*. Dordrecht; Heidelberg; New York; London: Springer, 2015, P. 2835–2860.
5. Wilson D. B., Göktogan A. H., Sukkarieh S. A vision based relative navigation framework for formation flight // *IEEE International conference on robotics and automation (ICRA)*. 2015. P. 4988–4995.
6. Binetti P., Ariyur K. B., Krstic M., Bernelli F. Formation flight optimization using extremum seeking feedback // *Journal of guidance, control, and dynamics*. 2003. Vol. 26 (1). P. 132–142.
7. Зенкевич С. Л., Галустян Н. К. Децентрализованное управление группой квадрокоптеров // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2016. № 11. С. 774–782.
8. Ivanov D., Kaliev I., Kapustjan S. Formation task in a group of quadrotors // *Robot Intelligence Technology and Applications 3*. Springer International Publishing, 2015. P. 183–191.
9. Paul T., Krogstad T. R., Gravdahl J. T. Modelling of UAV formation flight using 3D potential field // *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2008. Vol. 16 (9). P. 1453–1462.
10. Park C., Cho N., Lee K., Kim Y. Formation flight of multiple UAVs using onboard information sharing // *Sensors*. 2015. Vol. 15. P. 17397–17419.
11. Beard R. W., Lawton J., Hadaegh F. Y. A coordination architecture for formation control // *IEEE transactions on control systems technology*. 2001. Vol. 9 (6). P. 777–790.
12. Гайдук А. Р. Управление группой БЛА с ограничением на управление и переменные состояния // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2012. № 7. С. 52–57.
13. Beard R. W., McLain T. W. *Small unmanned aircraft: theory and practice*. Princeton and Oxford: Princeton University Press, 2012.
14. Yuasa H., Ito M. Coordination of many oscillators and generation of locomotory patterns // *Biological Cybernetics*. 1990. Vol. 63 (3). P. 177–184.
15. Yamaguchi H., Arai T. Distributed and autonomous control method for generating shape of multiple mobile robot group // *IEEE/RSJ/GI International conference on intelligent robots and systems IROS'94*. 1994. Vol. 2. P. 800–807.

UAVs Group Control Based on the Relative State Space Method

R. A. Munasypov, rust40@mail.ru, T. Z. Muslimov, tagir.muslimov@gmail.com✉

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, 450000, Russian Federation

Corresponding author: **Muslimov T. Z.**, Graduate Student,
Ufa State Aviation Technical University, Ufa, 450000, Russian Federation,
e-mail: tagir.muslimov@gmail.com

Accepted on October 20, 2017

In this paper, the problem of fixed-wing unmanned aerial vehicles (UAVs) group control was solved using the relative state space method. To achieve this goal the authors created a flight dynamic model of a fixed-wing UAV. Then it was linearized using MATLAB built-in routine and the standard PID autopilot was synthesized. The control inputs for the UAV's inverse kinematic model were calculated based on relative state space method, which is decentralized control of the multi-agent system, fault-tolerant in the sense that the failure of individual agents does not lead either to the failure of the entire system or to the inability to further build and maintain the formation. Each agent has autonomy, i.e. the ability to control part of the system's global state. This method is a bio-inspired algorithm based on the model of living organisms' motor neurons network. In comparison with the "leader-follower" method, the relative state space approach involves the construction of a control hypersurface in the relative state space instead of just following "leader" commands. In addition, this method is resistant to atmospheric disturbances in comparison with virtual structure approach and it has a low computational complexity. Initially the relative state space method was developed only for linear control objects without taking into account their dynamics. Therefore, it was modified by the authors to be applicable to nonlinear control objects (for example, fixed-wing UAVs). The math modeling in MATLAB/Simulink shows successful solution of the problem. Further research will focus on optimization of the formation building time, considering the vehicles collision avoidance and creating path-following algorithms based on the above method.

Keywords: UAV control, UAV group control, UAV formation, multi-agent system, decentralized control, gradient system.

For citation:

Munasypov R. A., Muslimov T. Z. UAVs Group Control Based on the Relative State Space Method, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 2, pp. 120–125.

DOI: 10.17587/mau.19.120-125

References

1. Sundaram B., Palaniswami M., Reddy S., Sinickas M. Radar localization with multiple unmanned aerial vehicles using support vector regression, *Intelligent sensing and information processing*, 2005, pp. 232–237.
2. Chandra R. S., Breheny S. H., D'Andrea R. Antenna array synthesis with clusters of unmanned aerial vehicles, *Automatica*, 2008, vol. 44, pp. 1976–1984.
3. Garza J., Panduro M. A., Reyna A., Romero G., del Rio C. Design of UAVs-based 3D antenna arrays for a maximum performance in terms of directivity and SLL, *International Journal of Antennas and Propagation*, 2016.
4. Coopmans C., Stark B., Jensen A., Chen Y. Q., McKee M. Cyber-physical systems enabled by small unmanned aerial vehicles, In K. P. Valavanis, G. J. Vachtsevanos (Eds.), *Handbook of unmanned aerial vehicles*. Dordrecht; Heidelberg; New York; London, Springer, 2015, pp. 2835–2860.
5. Wilson D. B., Göktoğan A. H., Sukkarieh S. A vision based relative navigation framework for formation flight, *IEEE International conference on robotics and automation (ICRA)*, 2015, pp. 4988–4995.
6. Binetti P., Ariyur K. B., Krstic M., Bernelli F. Formation flight optimization using extremum seeking feedback, *Journal of guidance, control, and dynamics*, 2003, vol. 26 (1), pp. 132–142.

7. Zenkevich S. L., Galustyan N. K. *Decentralizovannoe upravlenie gruppoj kvadropteroev* (Decentralized Control of a Quadcopter Swarm), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 11, pp. 774–782 (in Russian).

8. Ivanov D., Kaliev I., Kapustjan S. Formation task in a group of quadrotors, *Robot Intelligence Technology and Applications 3*, Springer International Publishing, 2015, pp. 183–191.

9. Paul T., Krogstad T. R., Gravdahl J. T. Modelling of UAV formation flight using 3D potential field, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2008, vol. 16 (9), pp. 1453–1462.

10. Park C., Cho N., Lee K., Kim Y. Formation flight of multiple UAVs using onboard information sharing, *Sensors*, 2015, vol. 15, pp. 17397–17419.

11. Beard R. W., Lawton J., Hadaegh F. Y. A coordination architecture for formation control, *IEEE transactions on control systems technology*, 2001, vol. 9 (6), pp. 777–790.

12. Gaiduk A. R. *Upravlenie gruppoj BLA s ogranicheniem na upravlenie i peremennye sostojaniya* (Control by Group of Unmanned Aerial Vehicles with Restriction on Control Actions and State Variables), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2012, no. 7, pp. 52–57 (in Russian).

13. Beard R. W., McLain T. W. *Small unmanned aircraft: theory and practice*, Princeton and Oxford, Princeton University Press, 2012.

14. Yuasa H., Ito M. Coordination of many oscillators and generation of locomotory patterns, *Biological Cybernetics*, 1990, vol. 63 (3), pp. 177–184.

15. Yamaguchi H., Arai T. Distributed and autonomous control method for generating shape of multiple mobile robot group, *IEEE/RSJ/GI International conference on intelligent robots and systems IROS'94*, 1994, vol. 2, pp. 800–807.

В. В. Чекушкин, д-р техн. наук, проф., chekvv@gmail.com, **С. Н. Жиганов**, канд. техн. наук, доц.,

А. А. Быков, канд. техн. наук, доц.,

Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО "Владимирский государственный университет
имени А. Г. и Н. Г. Столетовых",

К. В. Михеев, инженер-конструктор 2 кат., kiri-mikheev@yandex.ru,
АО "Муромский завод радиоизмерительных приборов"

Воспроизведение траекторий движения объектов в системах контроля воздушного пространства

Для режима реального времени разработан метод наглядного формирования траекторий воздушных объектов из плавно сопрягаемых сегментов в системе координат зоны обзора радиолокационной станции. Геометрические формы сегментов общей траектории выстраиваются на основе итерационного изменения расположения координат опорных ломаных линий кривых Безье с плавным изменением радиусов кривизны, исключены перегрузки на всех участках.

Ключевые слова: траектория, кривая Безье, перегрузки, радиус кривизны, кинематика движения

Введение

Для обучения и тренировки операторов систем управления воздушным движением и контроля воздушного пространства необходимо использовать учебно-тренировочные средства, которые обеспечивают моделирование сложной воздушной обстановки в зоне ответственности радиолокационных станций (РЛС). Применение тренажеров позволяет повысить уровень подготовки специалистов за счет реализации оптимальной практической учебной нагрузки без применения дополнительных технических средств. В этом случае вместо реальной воздушной обстановки, получаемой, например, с выхода приемопередающего канала РЛС, с тренажера через коммутатор вводятся сигналы, имитирующие отражения от воздушных объектов, и (или) выполняется их наложение на реальный первичный эхосигнал [1, 2]. Таким образом, основная задача тренажера состоит в имитации движения воздушных объектов в синхронизированном, едином с работой систем РЛС временном и координатном пространстве. Аппаратуру и программное обеспечение, которые применяются для решения этой задачи, целесообразно также использовать для генерации тестовых воздействий при моделировании и функционально-диагностическом контроле систем РЛС.

Формирование траекторий движения воздушных объектов состоит в ручном вводе координат опорных точек, образующих очерчивающую траекторию движения ломаную линию, с указанием скоростей полета в этих точках при последовательном (по мере ввода) накоплении массива информации об опорных точках, автоматическом расчете уравнений движения по трем координатам $x(t_p)$, $y(t_p)$, $z(t_p)$ в реальном времени t_p , скорости

$V(t)$ вдоль прямолинейных курсов и переходных кривых с плавным изменением радиуса кривизны R_k , образованных чередующимися круговыми и параболическими сегментами, в режиме задания траектории. В режиме расчета текущего положения объекта (воспроизведения траектории) вычисленные параметры законов движения извлекаются из памяти и используются в качестве операндов при определении его положения на траектории путем подстановки в рассчитанные уравнения движения текущего значения времени t_p , периодически поступающего с таймера в качестве внешнего сигнала на запрос координат объекта [1, 2]. Этому способу присущи недостатки. Процесс формирования траектории не обладает наглядным, интуитивным представлением задания сложных вариантов ее воспроизведения с гибкой, постепенной деформацией формы и кривизны. Траектория движения объекта образуется только набором чередующихся круговых, параболических и прямолинейных сегментов. Траектория более адаптирована для имитации плоских маневров воздушного объекта. Движение вдоль каждого сегмента тривиально: в общем случае оно является равноускоренным, как вариант — равномерным. Оператор лишен возможности решающим образом определять скоростной режим движения объекта вдоль траектории: способ допускает задание только мгновенной скорости в каждой узловой точке опорной ломаной линии, которая интерпретируется методом как скорость в точке выхода объекта на переходную кривую, сглаживающую траекторию вблизи соответствующей точки, каждая переходная кривая имеет ось симметрии. Обеспечено точное аналитическое воспроизведение траектории в параметрической функции времени только для сегментов в виде отрезков прямых и дуг окружностей [3—6].

Известен способ описания кривой Безье, задаваемой с наглядным, интуитивным представлением отдельных сегментов ее воспроизведения, с гибкой, постепенной деформацией формы и кривизны [7]. Обеспечено параметрическое задание уравнений кривой по прямоугольным координатам в функции безразмерного параметра $t \in [0; 1]$. Но задается лишь геометрическая форма сегмента кривой и не обеспечивается воспроизведение траектории движения воздушного объекта с учетом его кинематики — скоростей, ускорений, непосредственно привязанных к каждой точке всей траектории в заданные моменты времени. Безразмерный параметр $t \in [0; 1]$ не привязан к реальному времени t_p движения по траектории. Не обеспечен контроль и корректировка динамических параметров движения в виде перегрузок, превышающих заданные предельные значения, например, для летчика больше восьмикратного ускорения свободного падения $g = 9,8 \text{ м/с}^2$. Не приведено комплексирование сложной траектории из сегментов, состоящей из разнообразных сопрягаемых участков, например, в виде отрезков прямых, у которых радиус кривизны равен бесконечности, и кривых с конечными значениями радиуса кривизны.

Целью работы является решение задачи наглядного формирования в реальном масштабе времени адекватной трассы полета в трехмерном пространстве без скачков скоростей и ускорений.

Математическая модель формирования геометрической формы траектории движения

В качестве траектории движения объекта используем кусочно-заданную пространственную кривую, состоящую из плавно совмещаемых сегментов в виде кривых Безье преимущественно первого и третьего порядков [8]. Параметрическое представление кривой по каждой из координат имеет вид

$$B(t) = \sum_{i=0}^n P_i B_i^n(t), \quad (1)$$

где n — степень кривой; i — порядковый номер опорной вершины; P_i — вектор координат i -й опорной точки по каждой из координат;

$B_i^n(t) = \frac{n!}{i!(n-i)!} t^i (1-t)^{n-i}$ — полином Бернштейна степени n ; t — безразмерный параметр, расположенный в интервале $t \in [0; 1]$.

Геометрическая форма каждого сегмента общей траектории движения задается на основе расположения n опорных точек ($\{P_i\} = \{x_i, y_i, z_i\}$, $i = 0, \dots, n-1$), т.е. опорной ломаной линии с n узлами. Совокупность такого набора сегментов позволяет представить прямолинейные участки траектории, участки с ненулевой кривизной

и описать различные виды маневра воздушного объекта. Использование кривой Безье более высокого порядка, чем третий, существенно не развивает ее свойства, но усложняет аналитические выражения для расчета мгновенных координат движущегося объекта. Положенное и геометрическое представление траектории движения объекта в пространстве плавно комплексировано из последовательно сопрягаемых сегментов с итерационными, наглядными, графическими интуитивными изменениями их формы и кривизны. В соответствии с выражением (1) проводится расчет параметрических уравнений движения в каждом сегменте по трем координатам $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ зоны обзора РЛС в функции безразмерного параметра $t \in [0; 1]$ и определяются минимальные значения радиусов кривизны траекторий.

Конкретное расположение смежных точек стыка на отдельных сопрягаемых сегментах необходимо выбирать таким образом, чтобы получить в целом гладкую и гибкую пространственную траекторию, управляемую точками P_i , положение объекта на каждом сегменте которой определяется как в виде безразмерного нормированного параметра $t \in [0; 1]$, так и в последующем в реальном текущем масштабе времени. В качестве примера приведена траектория на плоскости, состоящая из двух сегментов в виде кривых Безье 3-й и 1-й степеней (рис. 1), формируемых в соответствии с выражением (1):

$$B(t) = (1-t)^3 P_0 + 3t(1-t)^2 P_1 + 3t^2(1-t) P_2 + t^3 P_3$$

и $B(t) = (1-t) P_0 + t P_1$.

Для координат точек $P_0(0;0)$, $P_1(3;5,25)$, $P_2(6;3)$, $P_3(10;0)$ и $C_0(10;0)$ и $C_1(12;-1,5)$ получены параметрические уравнения:

$$\begin{aligned} x(t) &= 9t + t^3; \\ y(t) &= 15,75t - 22,5t^2 + 6,75t^3 \\ \text{и } x(t) &= 10 + 2t; \\ y(t) &= -1,5t. \end{aligned}$$

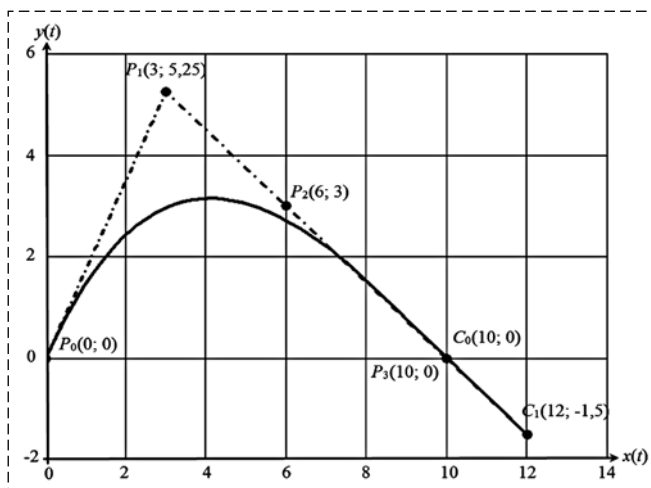


Рис. 1. Сопряжение кривой Безье 3-й степени с отрезком прямой

Такой широко распространенный переход объекта с прямолинейной на криволинейную траекторию и обратно не должен сопровождаться скачком центростремительной силы: $F_{ц} = mV^2/R_k = ma = mgn_{ц}$, где R_k — радиус кривизны; V — линейная скорость по кривой; $gn_{ц}$ — перегрузка ($g = 9,8 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения, $n_{ц}$ — числовой коэффициент). Если известны допустимая перегрузка и линейная скорость объекта при его движении по криволинейной траектории, то можно рассчитать минимальный радиус кривизны дуги: $R_{k \min} = V^2/(gn_{ц \max})$. Так, при скорости самолета $V = 1000 \text{ м/с}$ и максимальной переносимой пилотом перегрузке $gn_{ц \max} = 8g$ минимальный радиус кривизны составит: $R_{k \min} = 12,74 \text{ км}$. Т.е. на предельных для самолета скоростях радиус кривизны на переходной кривой не может быть меньше 13 км. Если радиус кривизны будет иметь меньшее значение, то необходимо менять опорные точки сопрягаемых сегментов траектории в выражении (1) таким образом, чтобы обеспечить более плавный переход, или вводить кривые 4-й степени, или вместо одной кривой Безье использовать несколько кривых. Таким образом, при задании геометрической формы кривой необходимо одновременно определять и минимальный радиус ее кривизны. Следует также предусмотреть и запас на допустимое линейное ускорение, которое векторно суммируется с тангенциальным. При переходе с одной кривой Безье на другую плавное изменение радиуса кривизны обеспечивается при непрерывности первой и второй производных сопрягаемых кривых. Для обеспечения непрерывности первой производной в соответствии с выражением (1) достаточно, чтобы три смежные опорные точки двух кривых (P_2, P_3, C_0, C_1) лежали на одной прямой, тогда при построении траектории две сопрягаемые кривые будут иметь общую касательную в точке стыка $C_0(10;0)$, т.е. равные первые производные. Для обеспечения непрерывности второй производной необходимо, чтобы пять смежных вершин двух кривых лежали на одной прямой или составляли выпуклый многоугольник. В данном случае достаточно четырех точек $P_1, P_2, P_3 = C_0, C_1$, поскольку точки P_3, C_0 — общие для двух сегментов (рис. 1). Для этого примера будет обеспечен плавный переход от отрезка прямой с радиусом кривизны $R = \infty$ до некоторого фиксированного минимального радиуса кривой Безье. Максимальная перегрузка для кубической кривой определяется минимальным радиусом в соответствии с выражением

$$R(t) = \frac{((x'(t))^2 + (y'(t))^2)^{3/2}}{y''(t)x'(t) - y'(t)x''(t)} = \frac{((9 + 3t^2)^2 + (15,75 - 45t + 20,25t^2)^2)^{3/2}}{(40,5t - 45)(9 + 3t^2) - (15,75 - 45t + 20,25t^2)(6t)}$$

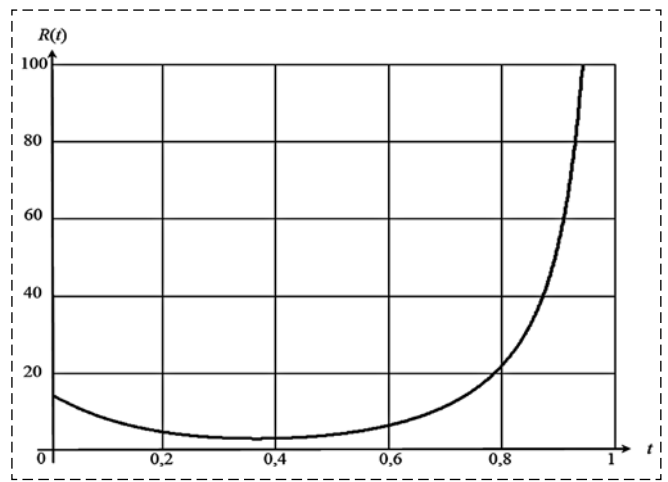


Рис. 2. График для определения минимального радиуса кривизны

Для проверки перегрузок строится график зависимости $R(t)$, по которой можно определить минимальный радиус кривизны (рис. 2), соответствующий заданному значению перегрузки. Заданные требования расположения точек P ограничивают множество кривых, поэтому на практике для соблюдения непрерывности вторых производных при сопряжении можно использовать полиномиальные кривые и более высокого порядка или несколько кубических кривых.

Воспроизведение траекторий в режиме реального времени

Имитация траектории движения должна проводиться в реальном масштабе времени, начиная с некоторого значения $T_{\text{нач}} = 0$. Текущее значение времени можно представить в виде линейно-нарастающей непрерывной или решетчатой функции времени $t_p = kT_t$ с дискретом T_t . В то же время в соответствии с выражением (1) кривая Безье для любого сегмента является функцией безразмерного параметра $t \in [0; 1]$, который определим как функцию нормированного времени $t \in [0; 1]$. Это время связано с реальным временем сложной функциональной зависимостью. Для фрагментов траектории с разной длиной пути S_{max} при постоянной скорости движения нормированное время прохождения сегмента остается постоянным. Для сегментов траектории с разной длиной пути и постоянной линейной скоростью движения на этих участках перенормируем параметр $t \in [0; 1]$ к реальному времени t_p прохождения каждого заданного сегмента исходя из условия, что каждому максимальному нормированному $t = 1$ будет соответствовать реальное время прохождения сегмента $t_{\text{max}} = S_{\text{max}}/V$.

Для получения кинематики движения объекта по траектории в функции реального времени при

изменении скорости необходимо получить функциональную зависимость значения времени t от аргумента t_p действительного текущего значения времени и наоборот. Нормированное и реальное время связывает пройденный путь S . Поэтому путь S используем как связующий параметр для определения текущих значений t , подставляемых в параметрические уравнения (1) для воспроизведения текущих значений координат траектории:

$$\begin{aligned}x(t) &= 9t + t^3; \\y(t) &= 15,75t - 22,5t^2 + 6,75t^3.\end{aligned}$$

Предварительно определим функциональные зависимости: $S(t)$, $S_{\max}$, обратные функции $t(S)$, а также их аппроксимации полиномами наилучшего приближения. Путь, пройденный по параметрически заданной кривой на плоскости (см. рис. 1) в функции нормированного времени, определяется формулой

$$S(t) = \int_0^t \sqrt{(x'(t))^2 + (y'(t))^2} dt. \quad (2)$$

Поскольку для интеграла (2) табличное представление отсутствует, то определим его в программе MathCAD путем численного интегрирования. При этом получим как длину пути $S_{\max}$ на заданном сегменте, так и точные отдельные промежуточные значения и графики функций $S(t)$ и $t(S)$. Например, путь вдоль линейной кривой Безье из т. $P_3(10; 0)$ в т. $C_1(12; -1,5)$ в соответствии с параметрическими уравнениями $x(t) = 10 + 2t$, $y(t) = -1,5t$ будет равен

$$S(t) = \int_0^1 \sqrt{((10 + 2t)')^2 + ((-1,5t)')^2} dt = 2,5.$$

Путь по кубической кривой на плоскости между точкой $P_0(0; 0)$ и точкой $C_1(12; -1,5)$ $S(t) = 12,23$ (см. рис. 1).

Для каждого из типов сегментов траектории предварительно по выражению (2) определяется максимальное значение пути $S_{\max}$ на каждом сегменте. $S_{\max}$ в последующем используется для определения уравнения скорости в функции реального времени $V = v(t_p)$. Из набора текущих, точных значений при численном интегрировании выражения (2) для воспроизведения сразу "эталонного" полинома Ньютона для обратной функции $t = g_{\text{эТ}}(S(t))$ с равномерным расположением узлов интерполяции (причем аргумент и функция меняются местами) выбирается примерно 5...8 дискретных значений функции t_i и соответствующие им значения аргумента S_i (узлов интерполяции полинома). С помощью полинома Ньютона 5...8-й степени воспроизводится "эталонная" монотонно нарастающая обратная функция $t = g_{\text{эТ}}(S)$ с приведенной относитель-

ной погрешностью порядка долей процента с последующей аппроксимацией ее фактически полиномом наилучшего приближения Чебышева $g(S) \cong g_{\text{эТ}}(S)$ более низкой степени. В этом полиноме для исключения скачков значения пути для границ интервалов (сегментов траектории) задаются значения: $(t_0 = 0, S_0 = 0)$; $(t_{\max} = 1, S = S_{\max})$. Вычисляются и оцениваются максимальные разности $g_{\text{эТ}}(S) - g(S)$ и приведенные значения погрешностей. Для последней значения не должны превышать 1...2 %.

Монотонно изменяющиеся прямые и обратные функциональные зависимости $S(t)$, $t(S)$ можно и аппроксимировать с высокой степенью точности полиномами наилучшего приближения 2-й или 3-й степени в соответствии с их графиками (рис. 3—5). Для уравнений

$$\begin{aligned}x(t) &= 9t + t^3; \\y(t) &= 15,75t - 22,5t^2 + 6,75t^3\end{aligned}$$

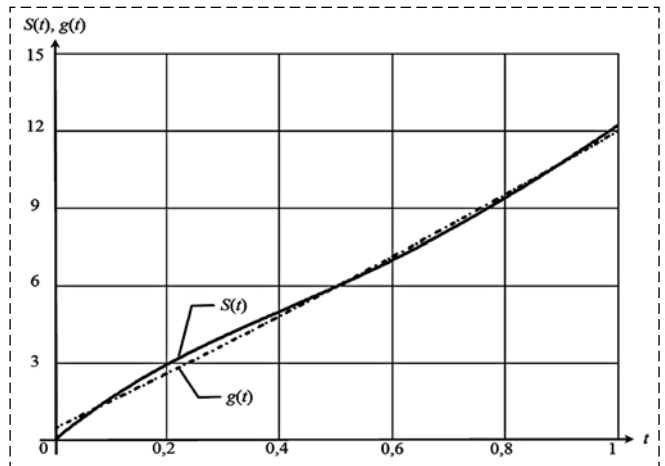


Рис. 3. Аппроксимация полиномом 2-й степени пути $S(t)$

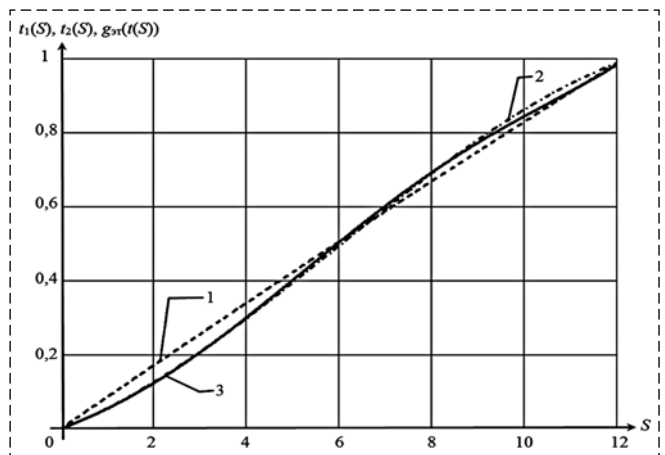


Рис. 4. Аппроксимация полиномами 2-й, 3-й степени обратной функции $t(S)$:

$$\begin{aligned}1 - t_1(S) &= 0,086S - 0,0003088S^2; \quad 2 - t_2(S) = 0,047S + 0,008807S^2 - \\&- 0,0004889S^3; \quad 3 - g_{\text{эТ}}(t(S)) = 0,048S + 0,005599S^2 + 0,0009126S^3 - \\&- 0,0001888S^4 + 0,000007793S^5\end{aligned}$$

в соответствии с графиком функций $S(t)$ получен полином наилучшего приближения 2-й степени. На рис. 3 кривая $S(t)$ построена в соответствии с выражением (2), а кривая $g(t) = 0,462 + 10,495t + 1,05t^2$ — полином наилучшего приближения 2-й степени.

Коэффициенты полинома вычислены исходя из матричных уравнений

$$A = \begin{pmatrix} 0,075^0 & 0,075^1 & 0,075^2 \\ 0,5^0 & 0,5^1 & 0,5^2 \\ 0,895^0 & 0,895^1 & 0,895^2 \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} 1,255 \\ 5,972 \\ 10,696 \end{pmatrix}$$

при оптимальных узлах аппроксимации полинома (значения безразмерного параметра t) 0,075, 0,5 и 0,895.

Построены графики погрешности аппроксимирующих полиномов 2-й и 3-й степени для обратной функции (рис. 4) $t_2(S) = 0,086S - 0,0003088S^2$ и $t_3(S) = 0,047S + 0,008807S^2 - 0,0004889S^3$ по отношению к "эталонному" полиному 5-й степени обратной функции.

На рис. 5 приведены графики погрешности аппроксимирующих полиномов 2-й и 3-й степени для обратной функции $t(S)$.

Относительная приведенная погрешность аппроксимации текущего значения пути не превышает для полиномов 2-й и 3-й степеней соответственно $0,05/12,22 \approx 0,004$ и $0,02/12,22 \approx 0,002$. Определенные параметры уравнения аппроксимации функциональных зависимостей являются исходными для определения кинематических параметров движения объекта, текущих значений координат траектории в функции реального времени.

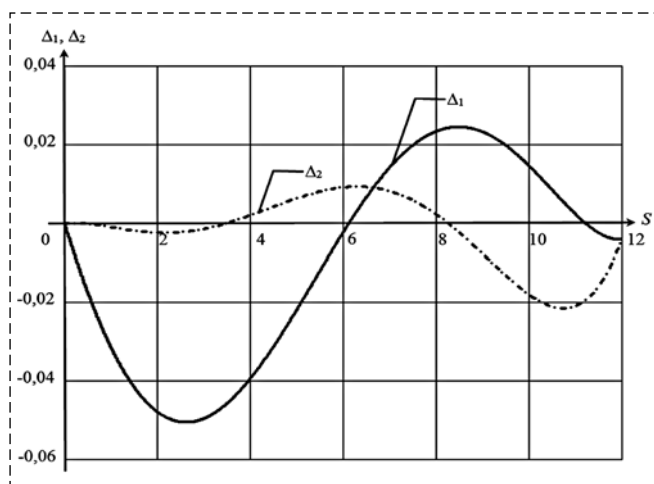


Рис. 5. График погрешности полиномов Ньютона 2-й и 3-й степеней по отношению к "эталонному" полиному 5-й степени: $\Delta_1 = g_{2T}(t(S)) - t_1(S)$; $\Delta_2 = g_{3T}(t(S)) - t_2(S)$

Движение с постоянной скоростью является наиболее простым и в то же время наиболее распространенным способом движения. Для первого сегмента траектории с такими условиями можно принять начальное значение времени $T_{\text{нач}} = 0$. При воспроизведении сегмента траектории в виде отрезка прямой с равномерным движением зависимость пути как от нормированного, так и от реального времени будет линейной. И при подстановке в параметрические уравнения воспроизведения траектории текущих нормированных значений времени (безразмерных значений параметра) при равномерном движении по отрезку прямой необходимо использовать выражение $t = t_p/t_{\text{max}}$, где реальное время прохождения сегмента $t_{\text{max}} = S_{\text{max}}/V$. При равномерном движении по кубической кривой для текущих значений t_p на заданном сегменте определяются линейно нарастающие значения пути $S = Vt_p$. По текущим значениям S определяются в соответствии с аппроксимирующим полиномом обратная функция $t(S)$ и нормированные значения времени t , после чего по параметрическим уравнениям вычисляются текущие значения прямоугольных координат.

При равнозамедленном, равноускоренном или других видах движения для исключения скачков значений скорости и ускорения линейная скорость и ускорение в начале следующего сегмента движения должны быть равны скорости и ускорению в конце предшествующего сегмента. Текущее значение пути при равноускоренном движении по заданному отрезку прямой или кривой можно определить в соответствии с формулой $S = Vt_p + at_p^2/2$.

После этого по аргументу — текущему пути S — с помощью полинома, аппроксимирующего обратную функцию $t(S)$, определяется нормированное время t .

При более сложных заданиях функции скорости от времени значение пути на сегменте вычисляется с помощью интеграла $S = \int_0^t V(t_p)dt$.

Комплексирование, стыковка отдельных сегментов траектории могут быть выполнены последовательно. Форму сегмента, его длину — максимальное значение пути S_{max} по сегменту — можно определять и варьировать при задании геометрической формы кривой. При назначенном значении начальной скорости значение ускорения, например, при равноускоренном движении можно изменять так, чтобы получить заданное время прохождения сегмента траектории в соответствии с квадратным уравнением, где $V_{\text{нач}}$ — начальная скорость; a — ускорение. Например, при $S = 1000$ м, $V_{\text{нач}} = 10$ м/с, $a = 2$ м/с² получим $t_{1,2} = (-20 \pm \sqrt{400 + 8 \cdot 2000})/4$ м/с² = 27,156 с (отрицательное значение отбрасывается) и т.д.

Итак, в соответствии с параметрическими уравнениями каждого сегмента в функции безразмерного параметра t вычисляется путь, пройденный по параметрически заданной кубической кривой в функции $S(t)$, воспроизводится обратная функция $t(S)$ с последующей аппроксимацией ее полиномом наилучшего приближения $g(t)$. По заданному закону воспроизведения скорости на заданном сегменте определяются текущее значение пройденного пути $S(t_{pi})$ в функции текущего временного интервала t_{pi} от начала сегмента и времени движения по сегменту, время прохождения сегмента. По общему, связывающему параметру текущего пути S на сегменте осуществляется переход от времени t_{pi} к параметру t с последующей подстановкой его в параметрические уравнения вычисления прямоугольных координат.

После проведения предварительных расчетов имеем отдельные сегменты, для начала и концов которых заданы абсолютные начальные и конечные значения прямоугольных координат, привязанные к точке стояния системы контроля воздушного пространства. Выполнена привязка начала и конца формирования каждого сегмента траектории к реальному значению текущего временного интервала, формируемого таймером реального времени. Для каждого сегмента получены: время воспроизведения его начала и время завершения, уравнения зависимости длины пути в сегменте от начала сегмента в функции относительного реального времени от начала временного интервала формирования сегмента, аппроксимирующие полиномы для воспроизведения зависимостей нормированного времени $t(S)$ в каждом сегменте, параметрические уравнения воспроизведения координат в функции нормированного времени в каждом сегменте.

Все рассчитанные функциональные зависимости, уравнения движения заносятся в память, например, рабочего места инструктора-оператора. После этого они в момент начала тренировки с воспроизведением траекторий движения на экране системы отображения информации передаются в блок расчета координат в соответствии с заданными геометрическими и кинематическими параметрами траектории.

Действия оператора, направленные на проектирование модели движения

Предварительные действия оператора, направленные на проектирование модели движения, подготовительные расчеты позволяют в общем временном интервале формирования траектории движения определить моменты времени начала и окончания, а также продолжительность движения объекта по каждому сегменту, которые позволяют идентифицировать именно тот сегмент, по которому перемещается объект в момент времени t_p воспроизведения каждого сегмента с присвоением ему порядкового номера. К каждому порядковому номеру сегмента привязываются его тип и уравнения движения на заданном сегменте. При задании траектории движения конечной целью проводимого при этом математического моделирования является создание в некритичном масштабе времени наиболее простых вычислительных алгоритмов с достаточно высокими точностными характеристиками для последующей реализации их в критическом реальном масштабе времени воспроизведения траектории с минимальным числом вычислительных операций и обращений к памяти. Данные заносятся оператором в таблицу (табл. 1), и ее заполнение по описанной методике позволяет получить траекторию движения. Погрешности воспроизведения функции приведут к незначительным колебаниям скорости движения по траектории.

Для каждого из типов сегментов траектории предварительно по описанной выше методике задаются параметрические уравнения движения $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$. Максимальные приведенные значения погрешностей не должны превышать 1...2 %. Предварительно задается закон изменения линейной скорости в функции t_p внутри каждого сегмента, позволяющий определить ее в заданный момент времени или пути. При равномерном движении ускорение равно нулю. При равноускоренном или равнозамедленном движении в сегменте задаются начальные и конечные значения ускорения. Фиксированные, контрольные значения скоростей также задаются в начальной и конечной точках сегмента. Каждое из уравне-

Таблица 1

Коэффициенты уравнений, параметров движения объекта по сегментам траектории

№ сегмента	Тип сегмента	T_n , с	T_k , с	Параметрические уравнения воспроизведения траекторий	S_{max}	$t = g(S) \cong g_{эп}(S)$	V_n	V_k	a_n	a_k	$V = v(t_p)$	$S = s(t_p)$	$V_k S(t_p)$	$V = f(t_p)$	h_0
0				$x(t), y(t), z(t)$											
$N - 1$															

Здесь T_n и T_k — моменты времени начала и окончания движения объекта по сегменту, которые позволяют идентифицировать именно тот сегмент, по которому перемещается объект в момент времени t_p

ний применимо только для своего номера и (или) типа сегмента. Должен быть проведен поверочный расчет по плавному изменению скоростей при переходе с сегмента на сегмент с плавными без скачков изменениями скорости и ускорений. Определение проходимого пути $S = s(t_p)$ в каждом сегменте выполняется в соответствии с заданным законом изменения скорости $V = v(t_p)$. Проходимый путь в реальном масштабе времени при более сложном законе изменения скорости определяется выражением $S = \int_0^t V(t_p) dt$ и должен быть равен пути $S_{\max}$, проходимому по всему сегменту кривой Безье. Возможен итерационный подбор уравнения скорости в сегменте $V = v(t_p)$, определяющего фактическое время окончания прохождения сегмента T_k , чтобы получить заданные временные интервалы совпадения прохождения начал и концов сегмента. После этого по общему, связывающему параметру текущего пути S на сегменте с помощью функций $t = g(S) \cong g_{\text{ст}}(S)$, $V = v(t_p)$ и $S = s(t_p)$ осуществляется переход от времени t_{p1} к параметру t с последующей подстановкой его в параметрические уравнения вычисления прямоугольных координат. Такая операция проводится для каждого сегмента. В результате формируется окончательная расчетная таблица (табл. 2), которая передается в память для последующего воспроизведения траектории каждого воздушного объекта.

Таблица 2

Расчетные данные для воспроизведения траектории

№ сегмента	Тип сегмента	T_n, c	T_k, c	Параметрические уравнения траекторий в заданном сегменте	$t = g(S)$	$S = s(t_p)$
0				$x(t), y(t), z(t)$		
$N - 1$						

С начала тренировки по линейно нарастающему временному интервалу с таймера блок вычисления координат определяет время начала работы на очередном сегменте, вычисляет текущие прямоугольные координаты в пределах сегмента, фиксирует время перехода к следующему сегменту. Применяя расчетные формулы движения по преодолеваемому в момент времени t_p сегменту траектории (для которого выполняется условие $T_n \leq t < T_k$), с использованием уравнений табл. 2 можно получить текущие значения координат с

заданной скоростью движения воздушного объекта. Данные расчеты осуществляются в автоматическом режиме по периодическим запросам от таймера. Отсчет времени в общем случае идет от начала воздушного полета.

Заключение

Разработан метод наглядного, интуитивного формирования траекторий воздушных объектов из плавно сопрягаемых сегментов в системе координат зоны обзора РЛС. Обеспечен контроль перегрузок. Рассмотрен алгоритм формирования траектории движения после задания оператором опорных точек траектории. Для упрощения расчетов предложено использовать аппроксимацию пройденного пути полиномом наилучшего приближения 2-й и 3-й степеней. Приведенный пример формирования траектории движения показал высокую эффективность разработанного метода и возможность его реализации в современных системах управления и контроля.

Список литературы

1. Чекушкин В. В., Бобров М. С., Аверьянов А. М. Имитация траекторий движения воздушных объектов для радиолокационных систем управления и контроля воздушного пространства // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 9. С. 70—80.
2. Чекушкин В. В., Аверьянов А. М., Бобров М. С. Способ имитации траекторий движения воздушных объектов. Патент № 2419072 от 20.05.2011. — Бюл. № 14.
3. Бобров М. С., Аверьянов А. М., Пискунов Г. Г., Чекушкин В. В. Реализация трасс движения воздушных объектов в тренажерно-моделирующих системах // Вопросы радиоэлектроники. Серия ЭВТ. Вып. 4. 2009. С. 157—177.
4. Аверьянов А. М., Бобров М. С., Чекушкин В. В. Параметрическое задание кинематики движения воздушного объекта на участке маневрирования // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 5. С. 67—73.
5. Аверьянов А. М., Бобров М. С., Чекушкин В. В. Оценка ускорения при аппроксимации параболических сегментов траектории движения объекта радиолокационного обнаружения // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Радиолокационная техника. Вып. 1. 2011. С. 184—192.
6. Курилов И. А., Аверьянов А. М., Павельев Д. В. Построение траектории движения воздушных объектов на основе непрерывных кусочно-линейных функций // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Радиолокационная техника. Вып. 1. 2011. С. 210—217.
7. Каханер Д., Моулер К., Нэш С. Численные методы и программное обеспечение. М.: Мир, 2001. 575 с.
8. Чекушкин В. В., Михеев К. В. Способ имитации траекторий движения объектов / Заявка на патент № 2015152966 от 09.12.2015 г.

The Reproduction of the Trajectories of Moving Objects in the Systems of Control of Air Space

V. V. Chekushkin, chekvv@gmail.com, **S. N. Zhiganov**, s_zh_72@mail.ru✉, **A. A. Bykov**,
Murom Institute (branch) "Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletov",
Murom, 602264, Russian Federation,
K. V. Miheev, kiri-mikheev@yandex.ru,
JSC Murom Plant of Radio Measuring Instruments, Murom, 602267, Russian Federation

Corresponding author: **Zhiganov Sergej N.**, Ph. D., Associate Professor
of IMS Murom Institute (branch) "Vladimir State University
named after Alexander and Nickolay Stoletov", Murom, 602264, Russian Federation
e-mail: s_zh_72@mail.ru

Accepted on November 12, 2017

For real-time developed a method of visual formation of trajectories of air objects of smoothly conjugated segments in the coordinate system of the zone of vision radar. The geometric shape segments of General trajectories are based on iterative change of the location of the reference polyline bézier curves with variable radii of curvature. As the trajectory of the object was used and the piecewise-specified spatial curve consisting of smoothly combine segments as Bezier curves mainly the first and third orders. The geometric shape of each segment of the total trajectory was set based on the location of n control points, i.e. the reference polyline with n nodes. When you specify a geometric shape of the curve were simultaneously determined by the minimum radius of its curvature. In addition there was a reserve in the amount of allowable linear acceleration, which is summed with a vector tangential. In the transition from one curve to another Bezier smooth change of the radius of curvature is ensured by continuous first and second derivatives matched curves. It is shown that to ensure the continuity of the first derivative, it is sufficient that three adjacent reference points of the two curves are collinear, then when you build the trajectories of the two mating curves will have a common tangent at the point of intersection, i.e., equal to the first derivative. To obtain the kinematics of the motion of an object along a path in real-time functions when the speed was obtained functional dependence linking the current value of the time and normalized time. Standardized and real-time links traversed path. Monotonically changing forward and backward functional dependency a journey from time to time was approximated with a high degree of accuracy by polynomials of the best approximation of the 2nd or 3rd degrees. The paper presents recommendations for operators to conduct preparatory calculations provide in General a time interval of formation of a trajectory of movement of air objects.

Keywords: trajectory, Bezier curve, acceleration, radius of curvature, the kinematics of the movement

For citation:

Chekushkin V. V., Zhiganov S. N., Bykov A. A., Miheev K. V. The Reproduction of the Trajectories of Moving Objects in the Systems of Control of Air Space, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 2, pp. 126—133.

DOI: 10.17587/mau.19.126-133

References

1. **Chekushkin V. V., Bobrov M. S., Aver'janov A. M.** Imitacija traektorij dvizhenija vozdušnyh ob#ektov dlja radiolokacionnyh sistem upravlenija i kontrolja vozdušnogo prostranstva (Simulation of trajectories of movement of air targets for radar control systems and airspace control), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2009, no. 9, pp. 70—80 (in Russian).
2. **Chekushkin V. V., Aver'janov A. M., Bobrov M. S.** Sposob imitacii traektorij dvizhenija vozdušnyh ob#ektov (Method of simulating trajectories of air objects), Patent № 2419072 ot 20.05.2011, Bjul. № 14 (in Russian).
3. **Bobrov M. S., Aver'janov A. M., Piskunov G. G., Chekushkin V. V.** Realizacija trass dvizhenija vozdušnyh ob#ektov v trenazhernomodelirujushhih sistemah (Implementation of traces of movement of air objects in the training and modeling systems), *Voprosy Radioelektroniki. Serija JeVT*, 2009, no. 4, pp. 157—177 (in Russian).
4. **Aver'janov A. M., Bobrov M. S., Chekushkin V. V.** Parametricheskoe zadanie kinematiki dvizhenija vozdušnogo ob#ekta na uchastke manevrirovanija (A parametric task of the kinematics of moving air object for section of the maneuvering), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2010, no. 5, pp. 67—73 (in Russian).
5. **Aver'janov A. M., Bobrov M. S., Chekushkin V. V.** Ocenka uskorenija pri approksimacii parabolicheskikh segmentov traektorii dvizhenija ob#ekta radiolokacionnogo obnaruzhenija (Assessment of acceleration in the approximation of parabolic segments of the trajectory of the object radar detection), *Voprosy Radioelektroniki. Serija Radiolokacionnaja Tehnika*, 2011, no. 1, pp. 184—192 (in Russian).
6. **Kurilov I. A., Aver'janov A. M., Pavel'ev D. V.** Postroenie traektorii dvizhenija vozdušnyh ob#ektov na osnove nepreryvnyh kusочно-linejnyh funkcij (Creation of a trajectory of movement of air objects on the basis of continuous piecewise linear functions), *Voprosy Radioelektroniki. Serija Radiolokacionnaja Tehnika*, 2011, no. 1, pp. 210—217 (in Russian).
7. **Kahaner D., Moler K., Njesh S.** Chislennye metody i programmnoe obespechenie (Numerical methods and software), Moscow, Mir, 2001, 575 p. (in Russian).
8. **Chekushkin V. V., Miheev K. V.** Sposob imitacii traektorij dvizhenija ob#ektov (Method of simulating trajectories of objects), *Zajavka na patent № 2015152966 ot 09.12.2015 g.* (in Russian).

Г. П. Шибанов, д-р техн. наук, проф., вед. науч. сотр., gpshibanov@mail.ru,
Государственный летно-испытательный центр им. В. П. Чкалова

Учет ошибок первичных преобразователей при контроле параметров полета летательного аппарата и диагностике его бортового оборудования

Оценивание средств контроля и диагностики требует применения специфических подходов независимо от динамики ЛА и адекватности моделирования всех контролируемых процессов. Турбулентность атмосферы и инструментальные ошибки первичных преобразователей (датчиков) могут оказывать превалирующее влияние на данный процесс и определять динамику средств контроля и диагностики. На этом и акцентируется внимание автором данной статьи и предложены соответствующие алгоритмы, позволяющие в процессе контроля параметров полета ЛА и диагностики его оборудования учесть ошибки первичных преобразователей.

Ключевые слова: первичный преобразователь, контроль, диагностика, вектор оценки, инструментальная ошибка, летательный аппарат, бортовое оборудование

При полете летательного аппарата (ЛА) в условиях высокой турбулентности окружающей его атмосферы он представляет собой нелинейную модель управления. Последняя же оказывает превалирующее влияние на выбор схемы контроля параметров полета ЛА и диагностики его бортового оборудования. Она также определяет и динамику средств контроля и диагностики. Поэтому в процессе проведенных исследований для имитации возникающих в турбулентной среде и наиболее опасных для ЛА порывов ветра была предложена модель системы "ЛА — турбулентная среда" с функцией спектральной плотности мощности.

В рамках указанной модели рассмотрены четыре типа причин появления инструментальных ошибок:

- медленный дрейф сигналов на информационных выходах первичных преобразователей или постепенное ухудшение характеристик объектов контроля и диагностики;
- внезапный отказ бортового оборудования типа короткого замыкания или обрыва информационных каналов и цепей электропитания;
- ошибки, связанные с масштабным фактором;
- ошибки, возникающие из-за высокой интенсивности шума.

Причины всех этих ошибок являются общими для большинства поддающихся осмысливанию ошибок, неисправностей и отказов.

В процессе маневрирования параметры ЛА, силовой установки и бортового оборудования изменяются в широких пределах. Для оценки состояния объектов контроля и диагностики обычно применяют метод, при котором заключение об истинном состоянии объекта принимается на основе степени близости текущего значения вектора состояния к его расчетному значению. Состояние объекта контроля и диагностики описывается

выражениями, связывающими номинальное значение C_0 сигналов на его выходе с наименьшим значением его внутренних параметров ΔA и изменениями ΔB сигналов на его входах u :

$$\begin{aligned}\dot{x} &= (A_0 + \Delta A)x + (B_0 + \Delta B)u; \\ y &= C_0 x, \quad y \in R^m, \quad u \in R^r, \quad x \in R^n, \end{aligned} \quad (1)$$

где A_0 , B_0 — номинальные значения соответствующих параметров; m — число выходов объекта контроля и диагностики; r — число входов; n — число состояний.

Эти состояния отображаются средствами контроля и диагностики в виде

$$\dot{\tilde{x}} = D\tilde{x} + B_0 u + KC_0 x, \quad (2)$$

где $D = (A_0 - KC_0)$.

Обозначим далее e инструментальную ошибку измерения и оценки состояния объекта контроля и диагностики или его отдельных элементов: $e = x - \tilde{x}$. Дифференцирование последнего равенства после подстановки в него переменных x и $\tilde{x}$, выраженных через D , ΔA , ΔB и u , приводит к уравнению

$$\dot{e} = (A_0 - KC_0)e + \Delta A x + \Delta B u, \quad (3)$$

обеспечивающему возможность широкой оценки ошибок. Для того чтобы создать работоспособную схему средств контроля и диагностики, необходимо учитывать, что элементы параметров траекторной чувствительности в ответ на маневрирование изменяются с различными скоростями. При этом наиболее высокую частоту изменения имеют элементы $\Delta A(x, u)$. Их спектральные характеристики позволяют выделить члены $\Delta A x$

и $\Delta B u$ в две такие группы частот, при которых возмущающие воздействия внешней среды могут рассматриваться независимо.

В предложенном подходе к построению средств контроля и диагностики могут быть, например, оценены независимо четыре состояния ЛА при реализации управления по продольному каналу. Вектор состояния $x \in R^4$ может быть получен на основе множества одиночных измерений, причем каждое из них реализуется с различными степенями наблюдаемости.

Оценка динамики изменения состояний может быть выполнена с использованием выражений

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{x}}_1 &= A_0 \tilde{x}_1 + B_0 u + K_1 (C_{01} x - C_{01} \tilde{x}_1); \\ \dot{\tilde{x}}_2 &= A_0 \tilde{x}_2 + B_0 u + K_1 (C_{02} x - C_{02} \tilde{x}_2),\end{aligned}\quad (4)$$

где $\tilde{x}_1$ и $\tilde{x}_2$ — векторы оценки состояния объекта контроля и диагностики, формируемые по двум автономным каналам измерения и обработки исходной информации.

Если ввести обозначения $e_1 = x - \tilde{x}_1$; $e_2 = x - \tilde{x}_2$; $e_{12} = e_1 - e_2 = \tilde{x}_2 - \tilde{x}_1$, то для нелинейного процесса с малыми параметрическими отклонениями можно записать

$$\begin{aligned}e'_1 &= (A_0 - K_1 C_{01}) e_1 + \Delta A x + \Delta B u; \\ e'_2 &= (A_0 - K_2 C_{02}) e_2 + \Delta A x + \Delta B u.\end{aligned}\quad (5)$$

В случае скрытых ошибок, отказов и неисправностей, которые принятыми методами тестирования не обнаруживаются, справедливо выражение

$$e'_{12} = A_0 e_{12} - K_1 C_{01} e_1 - K_2 C_{02} e_2. \quad (6)$$

А так как e_1 и e_2 зависят от элементов $\Delta A x$ и $\Delta B u$ в различной степени, то имеет место неравенство $K_1 C_{01} \neq K_2 C_{02}$. Кроме того, весьма непросто обеспечить соблюдение равенства $K_1 C_{01} e_1 = K_2 C_{02} e_2$. Поэтому методы оценки, определяемые совокупностью выражений (4), (5) и (6), на практике пока не получили широкого распространения.

Посредством использования пространства состояний в автоматическом средстве контроля и диагностики появляется избыточная информация, обеспечивающая оценку состояния методами параметрической чувствительности. Эта информация и используется для оценки ошибки, появляющейся в канале наблюдения или измерения значений параметров, характеризующих работоспособность объекта контроля и диагностики.

Применительно к продольному движению ЛА избыточная информация в аналитическом виде может быть получена и оценена на основе анализа уравнений, описывающих по продольному каналу управления короткопериодические (7) и фугоидные (8) перемещения ЛА в пространстве:

$$\begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_w & Z_q + U & 0 \\ m_w & m_q & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_\zeta \\ m_\zeta \\ 0 \end{bmatrix} \zeta; \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{\dot{\theta}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_u - \frac{x_w [z_u m_q - m_u (z_q + U)]}{z_w m_q - m_w (z_q + U)} & -q \\ \frac{-(z_u m_w - m_u z_w)}{z_w m_q - m_w (z_q + U)} & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \xi, \quad (8)$$

где в качестве независимых переменных используются: U — скорость горизонтального полета, вектор которой направлен вдоль строительной оси ЛА; $\dot{u}$ — боковая скорость; $\dot{w}$ — нормальная скорость; $\dot{q}$ — угловая скорость вращения ЛА по тангажу; θ — угол тангажа.

Входящие в выражения (7) и (8) элементы Z , x , m с соответствующими индексами являются в основном функциями скоростей U , $\dot{u}$ и параметров, обозначенных индексами, а также возбуждающих сигналов управления ξ и ζ .

Средство контроля и диагностики, обеспечивающее на практике измерение и анализ значений параметров, входящих в уравнения (7) и (8), имеет четыре автономных измерительных канала, три из которых настроены на анализ короткопериодических продольных колебаний ЛА и один — на анализ колебаний фугоидного типа. Применительно к короткопериодическим колебаниям один из трех упомянутых каналов осуществляет анализ результатов измерения параметров w , q , а два других — совокупность результатов измерения параметров w , q и θ , причем на входы двух последних каналов поступают результаты измерения параметров w , θ и, соответственно, q , θ .

Четвертый измерительный канал анализирует перемещение ЛА фугоидного типа на основе сопоставления результатов измерений параметров U и θ . Совокупность из четырех корректно созданных измерительных каналов может быть использована для выделения и локализации всех ошибок в сенсорной системе. Если, например, с ошибкой функционирует первичный преобразователь параметра w , то ошибка, индицируемая посредством w , q измерительного канала, будет относиться к ошибке, индицируемой каналом w , q , θ со входами w , θ . Подобным же образом определяется принадлежность возникающих ошибок и к другим первичным преобразователям (датчикам) объекта контроля и диагностики.

Основы описанного подхода могут также применяться и к диагностике компонентов ошибки при использовании децентрализованных измерительных каналов.

Функционирование средств контроля и диагностики, основанное на анализе состояний наблюдаемой модели объекта, может быть описано посредством выражений (1), (2), (3). Незвестные члены ΔAx и ΔBu обычно имеют слабую взаимосвязь и не включаются формирующей подсистемой пониженного порядка, описываемой уравнениями (7) и (8), в дополнение к характерному действию изменений параметра. Задача состоит в выборе такой структуры каждого из измерительных каналов, при которой весовые их сочетания дали бы на выходе "нулевой сигнал" в условиях отсутствия ошибки. Это специфическое применение задачи обнуления выхода средств контроля и диагностики для оценки пространства ошибок.

Дополнительного внимания заслуживает такая конструкция, которая сделана нечувствительной к параметрическим изменениям и чувствительной к ошибкам датчиков.

Рассмотрим два класса средств контроля и диагностики:

1) средства, для которых число измерений m равно числу состояний объекта контроля и диагностики n ;

2) средства, для которых $(n - m) > 1$, т.е. для которых в системе оценки состояния имеется неопределенность по крайней мере первого порядка.

В первом случае, когда $n = m$, имеется свобода в назначении произвольно всех n состояний, если (A_0, C_0) является наблюдаемой парой.

Для второго случая произвольное, но единственное в своем роде, назначение достигается посредством выделения по крайней мере $n - m$ собственных векторов и всех n состояний. Максимальное число выделенных незначащих собственных векторов, относящихся к пространству признаков, не подлежащих учету, возможно тогда, когда для $m = 2$ число возможных состояний равно $n - 1$, для $m = 3$ равно $n - 2$ и т.д.

Ошибочно определяемый сигнал, или сигнал ошибки, можно представить как

$$F(s) = WC_0 E(s) = 0, \quad (9)$$

где $E(s) = T(sI_k - J)^{-1} B_0 u^*(s)$; s — вектор чувствительности, формируемый на основе взвешенных пар ошибочных сигналов наблюдения измерительных каналов средства контроля и диагностики; $*$ — знак, обозначающий операцию свертки; W — общее число сигналов; I_k — число ошибочных пар наблюдений, $k = 1, n$, n — число состояний.

Для удобства системы обозначений принято $B_0 u^*(s) = B_0 \Delta B^* u(s)$. T является обобщенным базисом пространства состояний, устанавливающего связь истинного пространства состояний в канонической форме Жордана с системной матрицей J . Во всех случаях систему выявления ошибок необходимо строить таким образом, чтобы она не принимала изменение значений пара-

метров, характерное для нормально функционирующего объекта контроля и диагностики, как появление сигнала ошибки. Однако она должна быть чувствительна к сенсорно ошибочным сигналам, появление которых связано с нарушением правильности функционирования первичных преобразователей.

Если при $n = m$ матрица D оказалась диагональной с явными собственными значениями, то матрица J становится спектральной матрицей Λ :

$$D = (A_0 - KC_0) = \Lambda.$$

Тогда логически следует вывод о том, что

$$F(s) = (sI_n - \Lambda)^{-1} B_0 u^*(s) \\ \text{и } F(s) = WC_0 E(s) = 0.$$

Таким образом, задача сводится к тому, чтобы определить, какое из выбранных значений W будет удовлетворять уравнению (9). Дополнительные свойства могут быть достигнуты, если $n - r$ собственных векторов будут отнесены к недействительному пространству WC_0 . Важно, чтобы уменьшение порядка системы оценки ошибки, делающее r состояний ненаблюдаемыми, снижало ее чувствительность к изменениям параметров. Например, при $n = m = 2$, $r = 1$ ограничительный фильтр минимизирует чувствительность ошибочного сигнала $F(s)$ к параметрическим изменениям ΔAx и ΔBu .

В номинальном случае $\Delta A = \Delta B = 0$ и, когда появляется сенсорная ошибка, уравнение для ее определения принимает вид

$$\dot{e} = (A_0 - KC_0)e + \Delta Ax + \Delta Bu + K \Delta Cx.$$

При $n > m$ входная матрица B_0 может быть не более весовой матрицы W .

В этом случае можно записать

$$F(s) = T(sI_n - J)^{-1} T^{-1} B_0 u^*(s). \quad (10)$$

С учетом (10) возможно выделить такую обобщенную собственную структуру для D , что будет выполняться условие $WC_0 m_i = 0$, где $i = 1, \dots, m - 1$, и m_i является явным правым собственным вектором $D = (A_0 - KC_0)$. В этом случае будет соблюдаться условие

$$WC_0 E(s) = 0. \quad (11)$$

Перемещения оцениваемой ошибки в недействительную или незначащую область пространства WC_0 будут нечувствительными к параметрическим изменениям, воздействующим на A_0 . В этом состоит двойственность важного результата, который первоначально был использован при решении задач управления.

Перемещения, близкие к незначащему пространству, также могут иметь низкую чувстви-

тельность к изменению параметров. Это достигается следующим образом.

1. Для D^T находится правый собственный вектор v системы управления: $(A_0^T - K^T C_0^T)v = D^T v$; $v \in R^n$, и путем транспонирования v^T находится левый собственный вектор для D : $v^T D = v^T \lambda$.

2. Упомянувшееся ранее свойство приводит к хорошо известному результату, существо которого сводится к тому, что правые собственные векторы систем D и D^T оказываются ортогональными. Полученный результат распространяется на случай, в котором m собственных векторов вырождаются в простой ряд с числом членов, равным m . Это достигается использованием обобщенных собственных векторов системы D . Условием ортогональности является условие

$$\langle m_i, v_k \rangle = 0, i \neq k, \quad (12)$$

для $D^T v_i = v_i \lambda_i$ и $D m_i = m_i \lambda_i$.

3. Если v_i является правым собственным вектором системы D^T , то по крайней мере один правый собственный вектор D^T может быть выбран таким образом, чтобы удовлетворялось условие (12).

Таким образом, один собственный вектор системы D^T является найденным и обобщенные правые собственные векторы системы D вызывают m вычеркиваний нулевых полюсов в уравнении (11) так, что порядок $E(s)$ уменьшается от n до 1. Область пространства WC_0 является, таким образом, как и требуется, динамической областью первого порядка. Это происходит потому, что установление двух линейно зависимых собственных векторов приводит к аннулированию двух пар нулевых полюсов и, как следствие, к уменьшению индекса показателя наблюдаемости измерительного канала до 1. Отмеченное выше позволяет учитывать компоненты оцениваемой ошибки как ответную реакцию на сенсорные погрешности.

Для общей системы с $n > m$ данная форма решения может быть получена только для наблюдаемой пары (A_0, C_0) и по меньшей мере для $n - m$ правых собственных векторов во всей области пространства WC_0 . Это может быть достигнуто использованием условий свободного назначения таких векторов. Для того чтобы достичь требуемой информативности собственного вектора, должно быть использовано обобщенное его назначение.

В заключение следует отметить, что задача, решаемая средствами контроля и диагностики, реализующими условие $F(s) = WC_0 E(s) = 0$, известна как задача "обнуления выхода", которая привлекает все большее внимание специалистов в области контроля и диагностики сложных технических систем. Этот подход хорошо зарекомендовал себя при использовании в контрол-

лерах переменной структуры. Он известен как скользящий способ.

Для задачи, в основу решения которой положен данный способ, характерно то, что он позволяет создавать модели контролируемых процессов, обеспечивающие прогнозирование возможного их развития. Посредством аппаратного уменьшения порядка подсистем в измерительных каналах способ обнуления выхода может быть также применен к решению задачи диагностики неисправностей, ошибок и отказов.

Коммутирующая обратная связь в измерительных каналах является нежелательной, поскольку она может снизить чувствительность системы оценки ошибки к сенсорным погрешностям. Посредством аналитической избыточности первого порядка в каждом измерительном канале полюс избыточности может быть выбран таким, чтобы соответствовать узкополосному фильтру с низкой чувствительностью к параметрическим изменениям.

Если сигнал обнаружения ошибки для i -го измерительного канала обозначить $F_i(s)$, то суммарный сигнал, охватывающий все системы, может быть найден как

$$S = [F_1(s), F_2(s), \dots, F_k(s)]^T = 0,$$

где k — число перестановок, приводящих в порядок m измерений, полученных по времени произвольно.

Таким образом, посредством использования оценки ошибки в наблюдаемом пространстве может быть реализован мощный подход к задаче диагностики ошибок, неисправностей и отказов. Такой подход основан на использовании фильтра определения ошибки исправного измерительного канала, в котором минимизированы влияния параметрических измерений и нарушений правильности протекания контролируемых процессов. Использование пространства ошибок наблюдения снимает необходимость определения вектора оценки состояния, и, следовательно, средства контроля и диагностики конструктивно могут быть выполнены на основе бортовых вычислительных систем, функционирующих в реальном масштабе времени.

Применение совокупности средств контроля и диагностики с различными измерительными параметрами проявляется в дополнительных преимуществах, дающих возможность выделения ошибок. Это было продемонстрировано на примере моделирования процесса функционирования гироскопической системы, когда ошибки в ней были обнаружены и локализованы в пределах отрезка времени, не превышающего 200 мс. Указанное время восстановления реалистично и говорит о том, что данный подход может быть успешно применен к потенциально неустойчивому ЛА.

Список литературы

1. **Контроль** функционирования больших систем / Под ред. Г. П. Шибанова. М.: Машиностроение, 1977. 360 с.
2. **Майоров А. В., Москатов Г. К., Шибанов Г. П.** Безопасность функционирования автоматизированных объектов. М.: Машиностроение, 1988. 263 с.
3. **Шибанов Г. П.** Бортовой контроль этапа разбега самолета и обеспечения безопасности взлета // Проблемы безопасности полетов. 1988. № 8. С. 32—45.
4. **Шибанов Г. П.** Контроль состояния технических систем по изменению светового фона приборных панелей // Автометрия. 1972. № 4. С. 105—109.
5. **Шибанов Г. П.** Обеспечение функциональной надежности электронных систем при неполной информации о состоянии их блоков // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 7. С. 471—474.
6. **Шибанов Г. П.** О возможности повышения живучести бортовых однородных вычислительных структур летательных аппаратов // Информационные технологии. 2007. № 1. С. 2—6.
7. **Шибанов Г. П.** Оптимизация процесса контроля бортовых комплексов оборудования // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 6. С. 56—61.
8. **Шибанов Г. П.** Оценка эффективности автоматизации процессов контроля оборудования // Основные вопросы теории и практики надежности. М.: Советское радио, 1975. С. 336—342.
9. **Шибанов Г. П.** Распознавание в системах автоконтроля. М.: Машиностроение, 1973. 428 с.

Account of Errors of Transducer during Inspection of Flying Device

G. P. Shibanov, gpshibanov@mail.ru✉,

Government Test-flight Center named after V. P. Chkalov, Akhtubinsk, Russian Federation

Corresponding author: **Shibanov Georgy P.**, D. Sc., Professor, Leading Researcher, Government Test-flight Center named after V. P. Chkalov, Akhtubinsk, Russian Federation, e-mail: gpshibanov@mail.ru

Accepted on November 02, 2016

Any structure of automation means of checkout flight parameters of flying device and diagnostics of onboard equipment which taking as a basis on linearization mathematical model of flying device will have another description for non-linearity mathematical model this flying device. In this case automation means of checkout employment practice unfit for testing of parameters of flight and diagnostics of onboard equipment. Estimation effectiveness of automation diagnostics of onboard equipment and checkout parameters of flight require employment of new methods and approach independently from the dynamics of flying device and adequate of mathematical models everybody of checkout process. Indignation of atmosphere and instrumental errors of transducers exercise influence on selection of scheme checkout and diagnostics. They can be determine of dynamics systems of checkout and diagnostics. At the same time sensor errors or errors of transducer can be detect and become localized without use altogether vector of estimation condition of checkout and diagnostics object. It can be make by means of weigh-procedure of measuring estimation error and off-error exit each of measuring canal. This article consideration the algorithms account of instrumental errors of transducers during inspection of flying device.

Keywords: account, error, transducer, checkout, diagnostics, measuring channel, estimation vector, flying device

For citation:

Shibanov G. P. Account of Errors of Transducer during Inspection of Flying Device, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 2, pp. 134—138.

DOI: 10.17587/mau.19.134-138

References

1. **Shibanov G. P.** ed. *Kontrol' funktsionirovaniya bol'shikh sistem* (Control works of great systems), Moscow, Mashinostroenie, 1977, 360 p. (in Russian).
2. **Mayorov A. V., Moskatov G. K., Shibanov G. P.** *Bezopasnost' funktsionirovaniya avtomatizirovannykh ob"ektov* (Safety works of automation object), Moscow, Mashinostroenie, 1988, 263 p. (in Russian).
3. **Shibanov G. P.** *Bortovoi kontrol' etapa razbega samoleta i obespecheniya bezopasnosti vzleta* (Onboard checkout of aircraft run and maintain of safety make a take-off), *Problems of Safety Flights*, 1988, no. 8, pp. 32—45 (in Russian).
4. **Shibanov G. P.** *Kontrol' sostoyaniya tekhnicheskikh sistem po izmeneniyu svetovogo fona pribornykh panelei* (The checkout of technical systems by lighting background of device panels), *Avtometriya*, 1972, no. 4, pp. 105—109 (in Russian).
5. **Shibanov G. P.** *Obespechenie funktsional'noi nadezhnosti elektronnykh sistem pri nepolnoi informatsii o sostoyanii ikh blokov* (Supply of function reliability of electronic systems when unsuitable information about condition of block), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 7, pp. 471—474 (in Russian).
6. **Shibanov G. P.** *O vozmozhnosti povysheniya zhivuchesti bortovykh odnorodnykh vychislitel'nykh struktur letatel'nykh apparatov* (About opportunity increase of survivability of onboard computer structure of flying device), *Information Technology*, 2007, no. 1, pp. 2—6 (in Russian).
7. **Shibanov G. P.** *Optimizatsiya protsesssa kontrolya bortovykh kompleksov oborudovaniya* (Optimization of checkout onboard complex of equipment of flying device), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 6, pp. 56—61 (in Russian).
8. **Shibanov G. P.** *Otsenka effektivnosti avtomatizatsii protsessov kontrolya oborudovaniya* (Estimation effectiveness of automatic checkout of equipment), *Fundamental questions of theory and practice of reliability*, Moscow, Sovetskoe radio, 1975, pp. 336—342 (in Russian).
9. **Shibanov G. P.** *Raspoznavanie v sistemakh avtokontrolya* (Identification systems of automatic control), Moscow, Mashinostroenie, 1973, 428 p. (in Russian).

А. В. Яскевич, канд. техн. наук, нач. отдела, Andrey.Yaskevich@rsce.ru,
ПАО "Ракетно-космическая корпорация "Энергия" им. С. П. Королева"

Уравнения динамики стыковочных механизмов. Часть 2. Алгоритмы для кинематических контуров*

Рассматривается методика составления уравнений динамики механизмов для стыковки космических аппаратов. Она основана на преобразовании исходной структуры механической системы к древовидной на основе замены отдельных шарниров уравнениями связей в обратной последовательности, начиная с внешнего контура с максимальным номером. Решение этих уравнений методом разделения переменных осуществляется в прямой последовательности, начиная с первого контура, а редукция уравнений динамики преобразованной механической системы — вновь в обратной последовательности. Это позволяет описать движение произвольных механизмов данного класса.

Ключевые слова: космический аппарат, стыковочный механизм, уравнения динамики, уравнения связей, метод разделения обобщенных координат

Введение

Стыковочные механизмы (СтМ) космических аппаратов (КА), обеспечивающие их сцепку, поглощение кинетической энергии относительно движения и стягивание стыковочных интерфейсов, являются параллельными механизмами (ПМ) [1] с полностью замкнутой или частично "открытой" кинематической схемой. Их параллельные кинематические цепи (КЦ) образуют кинематические контуры, в которых все тела являются одновременно и предшествующими, и последующими. При составлении уравнений динамики (УД) механической системы (МС) ограничения на движения двух смежных тел КЦ, соединенных шарниром, могут учитываться явно в виде уравнений связей относительно координат, скоростей и ускорений или неявно — в виде рекуррентных кинематических соотношений (РКС), которые являются решением этих уравнений. Из-за отсутствия в кинематических контурах исходных и терминальных тел описать их, используя только РКС, невозможно. Поэтому эти контуры "размыкаются", т. е. отдельные или все их шарниры замещаются уравнениями связей. В результате исходная МС заменяется преобразованной. Если замещаются все шарниры, т. е. все уравнения связей учитываются в явном виде, то положение каждого тела определяется его координатами относительно неподвижного основания, а динамика МС описывается уравнениями Лагранжа 1-го рода. В этом случае уравнения связей составляются для отдельных тел, а не КЦ, и определяются более короткими математическими выражениями, а структура связей может быть произвольной. Однако при этом размерность системы УД является максимальной [2—4 и др.]. Если в контурах замещаются только отдельные шарниры, то большая часть уравнений связей учитывается неявно путем применения РКС для преобразованной МС, которая имеет древовидную структуру. Оставшиеся уравнения связей называются контурными, и они также могут учитываться в УД в явном или неявном виде.

Если кинематические, т. е. алгебраические, уравнения контурных связей учитываются в явном виде, то они объединяются с УД преобразованной МС в систему дифференциально-алгебраических уравнений (СДАУ) и обуславливают ее вырожденность, т. е. усложнение схем численного интегрирования. Мера этой вырожденности характеризуется индексом СДАУ, значение которого указывает на сложность обеспечения стабильности и точности решения. В системах с индексом 3 или 2 объединяются соответственно ускорения и координаты, ускорения и скорости, т. е. фактически различные неизвестные переменные. Их решение основано на приведении к одному составу неизвестных на основе той или иной схемы дискретизации, лежащей в основе неявной схемы численного интегрирования, например BDF-методов [5—8 и др.]. В СДАУ с индексом 1 неизвестными являются только обобщенные ускорения. В этом случае устойчивость решения обеспечивается более простым способом, например, использованием неявного метода интегрирования Эйлера, как, например, в работе [4], или введением в УД стабилизирующих сил, пропорциональных ошибкам и их производным в уравнениях связей [2, 9, 10]. Но в последнем случае введенные искусственные осцилляторы усложняют вид уравнений связей, вносят в систему несуществующие частоты и требуют экспертной настройки параметров, обеспечивающих устойчивость решения. Размерность СДАУ даже при частичном замещении шарниров превышает число степеней свободы исходной МС. Применение рекуррентных УД [11] не приводит к увеличению вычислительной эффективности из-за усложнения алгоритма расчета ускорений с учетом контуров. При этом уравнения остаются дифференциально-алгебраическими и состав их переменных не изменяется.

При неявном учете уравнений контурных связей используется их решение, т. е. выражение зависимых переменных через независимые. На его основе получаются УД в замкнутой форме минимальной размерности, равной числу степеней свободы исходной МС. Одной из первых в этом направлении была работа [12], в которой решения уравнений связей для координат и скоростей позволили определить энергию МС только через независимые переменные, после чего были использованы уравнения Лагранжа 2-го рода. Но УД в замкнутой форме относительно полного набора шар-

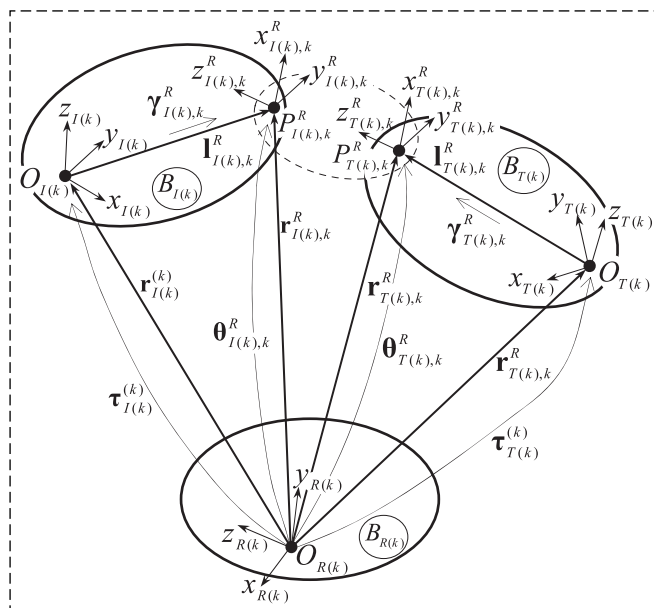
* Часть 1 опубликована в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление", 2018, Т.19, № 1.

нирных переменных преобразованной МС могут быть получены с помощью более эффективных алгоритмов, не основанных на данном формализме. Метод разделения обобщенных координат, предложенный в работе [13], позволяет редуцировать матрицу обобщенной инерции и вектор обобщенных сил вне зависимости от вида определяющих их математических выражений на основе решения уравнений связей для ускорений. В результате вместо СДАУ движение МС описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений минимальной размерности, увеличивается инерция, приведенная к степеням свободы, и, соответственно, устойчивость численного интегрирования УД. Естественно, метод разделения переменных применим только в случае существования решения уравнений контурных связей, т. е. при отсутствии у МС сингулярных конфигураций. Во многих случаях эта проблема может быть решена изменением состава независимых переменных. Метод разделения обобщенных координат [13] наилучшим образом подходит для моделирования МС СтМ с числом тел, значительно превышающим число степеней подвижности, с фиксированным составом независимых и зависимых переменных, с ограниченным числом вариантов зависимых КЦ и отсутствием сингулярных конфигураций. В данной работе рассматривается его модификация, позволяющая относительно просто учесть все возможные в классе СтМ варианты образования кинематических контуров.

Условия замыкания контуров для замещаемых шарниров

Здесь и далее используются обозначения, введенные в первой части этой работы [14]. Каждое j -е тело МС может содержать дополнительно к ранее введенным характерным точкам (ХТ) центры $P_{j,k}^R$ замещаемых шарниров k -го контура (см. рисунок).

Обозначения векторов и матриц, описывающих взаимное расположение систем координат (СК) $x_{R(k)}y_{R(k)}z_{R(k)}$ корневого тела $B_{R(k)}$ k -го контура на независимой ветви, СК $x_{I(k)}y_{I(k)}z_{I(k)}$ тела $B_{I(k)}$, замыкающего контур на независимой ветви, и СК $x_{T(k)}y_{T(k)}z_{T(k)}$ тер-



Геометрия тел, замыкающих k -й кинематический контур

минального тела $B_{T(k)}$ k -й зависимой ветви соответствуют принятой ранее нотации и не поясняются. В центрах $P_{I(k)}^R$ и $P_{T(k)}^R$ замещаемых шарниров тел $B_{I(k)}$ и $B_{T(k)}$ определяются локальные СК $x_{I(k),k}^R, y_{I(k),k}^R, z_{I(k),k}^R$ и $x_{T(k),k}^R, y_{T(k),k}^R, z_{T(k),k}^R$.

Особенности КЦ СтМ, рассмотренные в первой части работы, определяют условия замыкания кинематических контуров, в таблице описания которых каждая k -я строка содержит номер $R(k)$ корневого тела контура, номер $F(k)$ первого и $T(k)$ терминального тел в простой КЦ зависимой ветви, номер $I(k)$ тела в независимой ветви, замыкающего контур, и тип замещаемого шарнира. Номер замещаемого шарнира равен номеру контура, номеру зависимой ветви и номеру строки в таблице описания контуров. Нумерация начинается с внутренних контуров и заканчивается внешними. Их размыкание выполняется в обратной последовательности, начиная с контура с максимальным номером.

Если замещается k -й вращательный шарнир с тремя степенями подвижности (число налагаемых связей равно $m_k = 3$), то условия замыкания k -го контура для координат, скоростей и ускорений отражают совмещение центров этого шарнира в соединяемых им телах $B_{T(k)}$ в k -й зависимой ветви и $B_{I(k)}$ в независимой ветви:

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_{k,1} &= \mathbf{r}_{T(k),k}^{R(R(k))} - \mathbf{r}_{I(k),k}^{R(R(k))} = \mathbf{0}; \\ \dot{\mathbf{f}}_{k,1} &= \mathbf{v}_{T(k),k}^{R(R(k))} - \mathbf{v}_{I(k),k}^{R(R(k))} = \mathbf{0}; \\ \ddot{\mathbf{f}}_{k,1} &= \dot{\mathbf{v}}_{T(k),k}^{R(R(k))} - \dot{\mathbf{v}}_{I(k),k}^{R(R(k))} = \mathbf{0}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\mathbf{r}_{T(k),k}^{R(R(k))}$, $\mathbf{r}_{I(k),k}^{R(R(k))}$, $\mathbf{v}_{T(k),k}^{R(R(k))}$, $\mathbf{v}_{I(k),k}^{R(R(k))}$, $\dot{\mathbf{v}}_{T(k),k}^{R(R(k))}$, $\dot{\mathbf{v}}_{I(k),k}^{R(R(k))}$ — векторы положений, скоростей и ускорений точек $P_{T(k),k}^R$ и $P_{I(k),k}^R$ в СК $x_{R(k)}y_{R(k)}z_{R(k)}$; $\mathbf{f}_k$ — (3×1) -мерная вектор-функция.

Дополнительные условия замыкания контуров для зависимых КЦ вида $R_2R_2R_2$, $R_3P_1R_2$, $R_1R_3R_2$ с замещением вращательного шарнира с двумя степенями подвижности ($m_k = 4$) имеют вид

$$\begin{aligned} f_{k,2} &= \theta_{T(k),k}^R(2) \cdot \theta_{I(k),k}^R(3) = 0; \\ \dot{f}_{k,2} &= \mathbf{n}_{R,k}^* \cdot (\boldsymbol{\omega}_{T(k)}^{(R(k))} - \boldsymbol{\omega}_{I(k)}^{(R(k))}) = 0; \\ \ddot{f}_{k,2} &= \mathbf{n}_{R,k}^{*T} \cdot (\dot{\boldsymbol{\omega}}_{T(k)}^{(R(k))} - \dot{\boldsymbol{\omega}}_{I(k)}^{(R(k))}) + \\ &+ \dot{\mathbf{n}}_{R,k}^{*T} \cdot (\boldsymbol{\omega}_{T(k)}^{(R(k))} - \boldsymbol{\omega}_{I(k)}^{(R(k))}) = 0, \end{aligned}$$

где $\theta_{T(k),k}^R(2)$, $\theta_{I(k),k}^R(3)$ — вторая и третья вектор-строки соответствующих матриц; $\mathbf{n}_{R,k}^* = \theta_{T(k),k}^R(2) \times \theta_{I(k),k}^R(3)$ — единичный вектор в СК $x_{R(k)}y_{R(k)}z_{R(k)}$ оси, относительно которой вращение в шарнире невозможно;

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{n}}_{R,k}^* &= (\boldsymbol{\omega}_{T(k)}^{(R(k))} \times \theta_{T(k),k}^R(2)) \times \theta_{I(k),k}^R(3) + \\ &+ \theta_{T(k),k}^R(2) \times (\boldsymbol{\omega}_{I(k)}^{(R(k))} \times \theta_{I(k),k}^R(3)) \end{aligned}$$

— производная этого вектора, изменяющего ориентацию в процессе движения.

Однако в цепях $R_2R_2R_2$ трудно реализовать устройства, создающие активные моменты (привод, демпфер или пружинный механизм), а в цепях $R_3P_1R_2$ и $R_1R_3R_2$, эквивалентных $R_2P_1R_3$ и $R_1R_2R_3$, движение управляемого тела ограничено шарниром с меньшей подвижностью, чем в шарнире у основания, что нелогично и увеличивает приведенную к этому телу инерцию зависимой ветви. Поэтому зависимые КЦ, в которых $m_k = 4$, далее в этой работе не рассматриваются.

Условия (1) замыкания k -го контура преобразуются в уравнения контурных связей относительно полного вектора $\ddot{\mathbf{p}}$ шарнирных ускорений преобразованной МС:

$$\hat{\mathbf{T}}_{T(k),k}^{R(R(k))} \ddot{\mathbf{p}} + \mathbf{w}_{T(j),k}^{R(R(k))} - \hat{\mathbf{T}}_{I(k),k}^{R(R(k))} \ddot{\mathbf{p}} - \mathbf{w}_{I(k),k}^{R(R(k))} = \mathbf{0}, \quad (2)$$

в которых $(3 \times n)$ -мерные матрицы парциальных скоростей $\hat{\mathbf{T}}_{j,k}^{R(R(k))}$ ХТ $P_{j,k}^R$ относительно СК $x_{R(k),k}, y_{R(k),k}, z_{R(k),k}$, а также (3×1) -мерные векторы $\mathbf{w}_{j,k}^{R(R(k))}$ ($j \in \{T(k), R(k)\}$) ускорений этих ХТ, нелинейно зависящих от шарнирных скоростей, вычисляются по обычным РКС. Первые $R(k)$ столбцов матриц парциальных скоростей являются нулевыми, а векторы угловых скоростей и нелинейных составляющих ускорений не зависят от шарнирных скоростей $\dot{p}_k$, $k \leq R(k)$. Если корневым телом контура является основание механизма, то $R(k) = 0$.

Для плоских контуров ($m_k = 2$) определены аналоги пространственных векторно-матричных операций, и уравнения связей имеют вид, аналогичный (2).

Последовательное формирование и решение уравнений контурных связей

Особенность применения в данной работе метода, предложенного в статье [13], состоит в последовательном определении зависимых переменных каждого очередного контура, начиная с последнего, через все шарнирные переменные с меньшими номерами, в том числе через шарнирные переменные еще не рассмотренных контуров. Это позволяет использовать один несложный алгоритм для всех возможных вариантов структур СтМ. В частности, можно учесть наличие внутренних кинематических контуров у зависимых направляющих КЦ.

В обратной последовательности для каждого k -го контура, начиная с последнего ($k = \overline{K}, 1$), в символьном виде формируются $(m_k \times 1)$ -мерный вектор $\mathbf{p}_k^{(d)}$, содержащий шарнирные переменные его зависимой ветви, и $(n_k \times 1)$ -мерный вектор $\mathbf{p}_k^{(i)}$, состоящий из всех условно независимых n_k шарнирных переменных с меньшими номерами $\left(n_k = n - \sum_{i=1}^k m_i \right)$:

$$\mathbf{p}_k^{(d)}(i) = \mathbf{p}(n_k - m_k + i), \quad i = \overline{1, m_k};$$

$$\mathbf{p}_k^{(i)}(i) = \mathbf{p}(i), \quad i = \overline{1, n_k}.$$

Уравнения (2) контурных связей для ускорений k -го контура записываются в виде

$$\mathbf{C}_k^{(d)} \ddot{\mathbf{p}}_k^{(d)} = \mathbf{C}_k^{(i)} \ddot{\mathbf{p}}_k^{(i)} + \mathbf{c}_k, \quad (3)$$

где для $m_k = 3$ и $m_k = 2$

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_k^{(d)}(i, j) &= \hat{\mathbf{T}}_{T(k),k}^{R(R(k))}(i, n_k - m_k + j); \\ \mathbf{C}_k^{(i)}(i, j) &= \hat{\mathbf{T}}_{I(k),k}^{R(R(k))}(i, j); \\ \mathbf{c}_k(i) &= \mathbf{w}_{I(k),k}^{R(R(k))}(i) - \mathbf{w}_{T(j),k}^{R(R(k))}(i), \end{aligned} \quad (4)$$

$i = \overline{1, m_k}$, $j = \overline{1, m_k}$ для $\mathbf{C}_k^{(d)}$ и $j = \overline{1, n_k - m_k}$ для $\mathbf{C}_k^{(i)}$.

Матрицы $\mathbf{C}_k^{(d)}$, $\mathbf{C}_k^{(i)}$ и вектор $\mathbf{c}_k$ также формируются в символьном виде.

Решение уравнений контурных связей выполняется в прямой последовательности, т. е. от первого кон-

тура к последнему ($k = \overline{1, K}$). Для шарнирных скоростей и ускорений k -го контура оно имеет вид

$$\dot{\mathbf{p}}_k^{(d)} = [\mathbf{C}_k^{(d)}]^{-1} \mathbf{C}_k^{(i)} \dot{\mathbf{p}}_k^{(i)} = \mathbf{H}_k \dot{\mathbf{p}}_k^{(i)}, \quad (5)$$

$$\ddot{\mathbf{p}}_k^{(d)} = [\mathbf{C}_k^{(d)}]^{-1} (\mathbf{C}_k^{(i)} \ddot{\mathbf{p}}_k^{(i)} + \mathbf{c}_k) = \mathbf{H}_k \ddot{\mathbf{p}}_k^{(i)} + \mathbf{h}_k, \quad (6)$$

где

$$\mathbf{H}_k = [\mathbf{C}_k^{(d)}]^{-1} \mathbf{C}_k^{(i)}, \quad (7)$$

$$\mathbf{h}_k = [\mathbf{C}_k^{(d)}]^{-1} \mathbf{c}_k, \quad (8)$$

$\mathbf{C}_k^{(d)} = \partial \mathbf{f}_k / \partial \mathbf{p}_k^{(d)} = \partial \dot{\mathbf{f}}_k / \partial \dot{\mathbf{p}}_k^{(d)} = \partial \ddot{\mathbf{f}}_k / \partial \ddot{\mathbf{p}}_k^{(d)}$ — $(m_k \times m_k)$ -мерная матрица, $\mathbf{H}_k$ и $\mathbf{C}_k^{(i)}$ — $(m_k \times (n_k - m_k))$ -мерные матрицы; $\mathbf{h}_k$ и $\mathbf{c}_k$ — $(m_k \times 1)$ -мерные векторы.

Значения зависимых шарнирных координат в общем случае могут быть определены итерационным методом Ньютона:

$$\mathbf{p}_k^{(d), i+1} = \mathbf{p}_k^{(d), i} - [\mathbf{C}_k^{(d)}]^{-1} \mathbf{f}_k^{(d), i}, \quad (9)$$

что требует многократного вычисления тригонометрических функций углов в шарнирах и обращения матрицы $\mathbf{C}_k^{(d)}$.

Аналитическое решение уравнений контурных связей для координат

Для ограниченного числа типов зависимых ветвей контуров СтМ, рассмотренных в первой части работы [14], могут быть получены аналитические решения уравнений связей относительно координат, позволяющие исключить итерационную процедуру и сократить объем вычислений. Для всех зависимых КЦ предполагаются известными:

- положение в СК $x_{R(k)}, y_{R(k)}, z_{R(k)}$ корневого тела $R(k)$ центра первого шарнира вращения зависимой ветви k -го контура, т. е. вектор $\mathbf{l}_{R(k), F(k)}^{(R(k))}$, где $F(k)$ — номер первого звена зависимой ветви;
- положение в СК $x_{R(k)}, y_{R(k)}, z_{R(k)}$ центра $P_{I(k)}^R$ замещенного шарнира на звене $I(k)$ независимой ветви, т. е. вектор $\mathbf{r}_{I(k), k}^{(R(k))}$.

Для пространственных зависимых КЦ типа $R_2 P_1 R_3$ и $R_2 C_2 R_2$ длина $L_{0, k}$ зависимой КЦ в исходном положении (ИП) определяется как модуль вектора $\mathbf{L}_k^{(R(k))} = [L_k, m_k, n_k]^T = \mathbf{r}_{I(k), k}^{(R(k))} - \mathbf{l}_{R(k), F(k)}^{(R(k))}$. Длина $L_k = \sqrt{L_k^2 + m_k^2 + n_k^2}$ этого же вектора, вычисляемая в произвольном допустимом положении механизма, позволяет определить относительное перемещение в поступательном шарнире $p_{k, 3} = L_k - L_{0, k}$, а проекции этого вектора на оси СК первого шарнира $\mathbf{L}_k^{(F(k))} = [L_{k, x}^{(F(k))}, L_{k, y}^{(F(k))}, L_{k, z}^{(F(k))}]^T = \gamma_{R(k), F(k)} \mathbf{L}_k^{(R(k))}$ — тригонометрические функции углов $p_{k, 1}$ и $p_{k, 2}$ с учетом того, что при отклонениях СтМ от ИП $|p_{k, 1}| < 90^\circ$, $|p_{k, 2}| < 90^\circ$

$$\text{ctg } p_{k, 1} = -L_{k, x}^{(F(k))} / L_{k, z}^{(F(k))};$$

$$\sin p_{k, 1} = \frac{\text{sgn}(\text{ctg } p_{k, 1})}{\sqrt{1 + \text{ctg}^2 p_{k, 1}}}; \quad \cos p_{k, 1} = \sqrt{1 - \sin^2 p_{k, 1}};$$

$$\sin p_{k, 2} = L_{k, y}^{(F(k))} / L_k; \quad \cos p_{k, 2} = \sqrt{1 - \sin^2 p_{k, 2}}.$$

Для определения зависимых шарнирных координат необходимо вычислить разложением в ряд три математические функции, в то время как в решении (9) для КЦ $R_2P_1R_3$ необходимо вычислять четыре математические функции на каждой итерации.

В цилиндрическом шарнире шток является телом только с центральными моментами инерции. Так как во втянутом положении он полностью входит в корпус цилиндра, то в нем отсутствуют геометрические особенности, требующие учета угла его разворота относительно продольной оси. При таком развороте не изменяются и его инерционные свойства относительно любой системы координат, в том числе и при приведении к телам независимой ветви механизма. Поэтому в уравнениях динамики и при решении уравнений связей кинематическая цепь $R_2C_2R_2$ эквивалентна цепи $R_2P_1R_3$.

При определении шарнирных координат зависимой пространственной КЦ типа $R_1R_2R_3$ дополнительно предполагается известным единичный вектор $\mathbf{n}_{F(k)}^{P(R(k))} = [n_{F(k),x}^P, n_{F(k),y}^P, n_{F(k),z}^P]^T$ оси вращения ее первого шарнира. В ИП СтМ определяются параметры плоскости P_k , проходящей через центр этого шарнира нормально к $\mathbf{n}_{F(k)}^{P(R(k))}$, система координат $x_{F(k)}^J, y_{F(k)}^J, z_{F(k)}^J$ и матрица преобразования $\gamma_{R(k),F(k)}^J$. Далее для упрощения записи решения центры первого, второго и третьего (замещаемого) шарниров обозначаются

точками $O_{1,k} = (x_{1,k}, y_{1,k}, z_{1,k})$, $O_{2,k} = (x_{2,k}, y_{2,k}, z_{2,k})$ и $O_{3,k} = (x_{3,k}, y_{3,k}, z_{3,k})$, где $[x_{1,k}, y_{1,k}, z_{1,k}]^T = \mathbf{I}_{R(k),F(k)}^{(R(k))}$, $[x_{3,k}, y_{3,k}, z_{3,k}]^T = \mathbf{r}_{I(k),k}^{(R(k))}$. Проекция точки $O_{3,k}$ на плоскость P_k обозначается $O_{3,k}^P$. Положительные величины $l_{12,k}^P$, $l_{23,k}^P$, $l_{13,k}^P$ обозначают длины сторон треугольника $O_{1,k}O_{2,k}O_{3,k}^P$ в этой плоскости, определяющие угол $\varphi_{k,1}$ поворота от оси $y_{F(k)}^J$ до продольной оси $O_{1,k}O_{2,k}$ первого звена.

Кинематическая цепь $R_1R_2R_3$ в ИП и в процессе функционирования СтМ может иметь две различные конфигурации, характеризующиеся различными знаками угла $\varphi_{k,1}$. Предполагается, что переход из одной в другую, связанный с прохождением через сингулярность, не реализуется. Принимается, что $\varphi_{k,1} < 0$ соответствует первой из них, а $\varphi_{k,1} > 0$ — второй. В произвольном положении КЦ $R_1R_2R_3$ с учетом ее начальной конфигурации (знака угла $\varphi_{k,1}$) последовательно вычисляются:

1) координаты $x_{3,k}^P, y_{3,k}^P, z_{3,k}^P$ точки $O_{3,k}^P$ в текущем положении механизма:

$$\begin{aligned} x_{3,k}^P &= x_{3,k} + hn_{k,x}^P, & y_{3,k}^P &= y_{3,k} + hn_{k,y}^P, \\ z_{3,k}^P &= z_{3,k} + hn_{k,z}^P, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} h &= -(n_{F(k),x}^P x_{3,k} + n_{F(k),y}^P y_{3,k} + n_{F(k),z}^P z_{3,k} - \\ &\quad - \mathbf{n}_{F(k)}^{(R(k))T} \mathbf{I}_{R(k),F(k)}^{(R(k))}); \end{aligned}$$

2) расстояния между точками $O_{1,k}$, $O_{3,k}^P$ и $O_{2,k}$, $O_{3,k}^P$ в плоскости P_k :

$$\begin{aligned} l_{13,k}^P &= \sqrt{(x_{k,3}^P - x_{k,1})^2 + (y_{k,3}^P - y_{k,1})^2 + (z_{k,3}^P - z_{k,1})^2}, \\ l_{23,k}^P &= \sqrt{l_{23,k}^2 - h^2}; \end{aligned}$$

3) тригонометрические функции шарнирной переменной $p_{k,3}$:

$$\sin p_{k,3} = h/l_{23}, \quad \cos p_{k,3} = \sqrt{1 - (\sin p_{k,3})^2};$$

4) тригонометрические функции шарнирной переменной $p_{k,2}$:

$$\begin{aligned} \cos p_{k,2} &= -\frac{l_{12}^2 + l_{23}^2 - l_{13}^2}{2l_{12}l_{23}}, \\ \sin p_{k,2} &= -\operatorname{sgn} \varphi_{k,1} \sqrt{1 - (\cos p_{k,2})^2}; \end{aligned}$$

5) тригонометрические функции угла $\varphi_{k,3}$ поворота стороны $O_{1,k}O_{3,k}^P$ до совмещения со стороной $O_{1,k}O_{2,k}$ треугольника $O_{1,k}O_{2,k}O_{3,k}^P$:

$$\begin{aligned} \cos \varphi_{k,3} &= -\frac{l_{12,k}^2 + l_{13,k}^2 - l_{23,k}^2}{2l_{12}l_{13}}, \\ \sin \varphi_{k,3} &= \operatorname{sgn} \varphi_{k,1} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{k,3}}; \end{aligned}$$

6) тригонометрические функции угла $\varphi_{k,4}$ поворота оси y_k^P до совмещения со стороной $O_{1,k}O_{3,k}^P$ треугольника $O_{1,k}O_{2,k}O_{3,k}^P$:

$$\sin \varphi_{k,4} = -x_{k,3}^P/l_{13,k}^P, \quad \cos \varphi_{k,4} = y_{k,3}^P/l_{13,k}^P;$$

7) тригонометрические функции шарнирной переменной $p_{k,1}$ с учетом того, что $p_{k,1} = 90 + \varphi_{k,1}$ и $\varphi_{k,1} = \varphi_{k,3} + \varphi_{k,4}$,

$$\begin{aligned} \cos p_{k,1} &= -\sin \varphi_{k,1} = \\ &= -(\sin \varphi_{k,3} \cos \varphi_{k,4} + \cos \varphi_{k,3} \sin \varphi_{k,4}), \\ \sin p_{k,1} &= \cos \varphi_{k,1} = \cos \varphi_{k,3} \cos \varphi_{k,4} - \sin \varphi_{k,3} \sin \varphi_{k,4}. \end{aligned}$$

Если вращение первого звена ограничивается механическими упорами, то дополнительно вычисляется значение угла поворота

$$p_{k,1} = \arcsin(\sin p_{k,1}).$$

Всего необходимо вычислить разложением в ряд не более шести математических функций. При решении уравнений связей для ветви $R_1R_2R_3$ в общем виде (9) такое число функций вычисляется за одну итерацию.

Аналитические решения уравнений контурных связей относительно шарнирных координат для других зависимых КЦ определяются аналогично.

Редукция уравнений динамики в замкнутой форме

Уменьшение размерности матрицы обобщенной инерции и вектора обобщенных сил преобразованной МС проводится в обратной последовательности, начиная с последнего контура ($k = K, 1$):

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_k^{(ii)} &= \mathbf{A}_k^{(ii)} + \mathbf{A}_k^{(id)} \mathbf{H}_k + (\mathbf{A}_k^{(id)} \mathbf{H}_k)^T + \mathbf{H}_k^T \mathbf{A}_k^{(dd)} \mathbf{H}_k; \\ \mathbf{b}_k^{(i)} &= \mathbf{b}_k^{(i)} - \mathbf{A}_k^{(id)} \mathbf{h}_k + \mathbf{H}_k^T (\mathbf{b}_k^{(d)} - \mathbf{A}_k^{(dd)} \mathbf{h}_k), \end{aligned} \quad (10)$$

где верхние индексы i и d подматриц указывают на соответствие индексов их строк и столбцов независимым (условно независимым) или зависимым шарнирным переменным k -го контура.

Уравнения динамики ПМ после приведения к независимой ветви инерции и сил всех контуров имеют вид

$$\mathbf{A}_0^{(ii)} \ddot{\mathbf{p}}_0^{(i)} = \mathbf{b}_0^{(i)}, \quad (11)$$

где $\ddot{\mathbf{p}}_0^{(i)}$ является вектором обобщенных ускорений ($\ddot{\mathbf{p}}_0^{(i)} = \ddot{\mathbf{q}}$).

После решения этой системы линейных алгебраических уравнений относительно вектора $\ddot{\mathbf{p}}_0^{(i)}$ в прямой последовательности, от первого контура к последнему ($k = \overline{1, K}$) определяются зависимые шарнирные ускорения $\ddot{\mathbf{p}}_k^{(d)}$ решением уравнений (4). Определенные таким образом шарнирные ускорения и скорости позволяют рассчитать обобщенные силы, действующие на зависимую ветвь k -го контура:

$$\mathbf{Q}_k = \mathbf{C}_k^{(d)\tau} \boldsymbol{\lambda}_k = \mathbf{b}_k^{(d)} - \mathbf{A}_k^{(id)\tau} \ddot{\mathbf{p}}_k^{(i)} - \mathbf{A}_k^{(d)} \ddot{\mathbf{p}}_k^{(d)}, \\ k = \overline{1, K}.$$

Но эти векторы содержат значения сил и моментов, приведенных только к степеням подвижности. Поэтому силы и моменты, действующие на основание СтМ, определяются по алгоритму, рассмотренному в первой части работы, с использованием полных векторов $\mathbf{p}$, $\dot{\mathbf{p}}$, $\ddot{\mathbf{p}}$.

При расчете движения параллельного механизма на каждом шаге интегрирования последовательно вычисляются:

1) кинематика ХТ замещенных шарниров в независимой КЦ МС;

2) зависимые шарнирные координаты каждого контура, в прямой последовательности — сначала внешние контуры, потом внутренние ($k = \overline{1, K}$);

3) матрицы $\hat{\mathbf{T}}_{T(k),k}^{R(R(k))}$ парциальных скоростей для ХТ замещаемых шарниров каждого контура, в прямой последовательности;

4) матрицы $\mathbf{H}_k$ по соотношениям (4) и (7) в обратной последовательности — сначала внутренние контуры, потом внешние ($k = \overline{K, 1}$);

5) зависимые шарнирные скорости решением уравнений (5), в прямой последовательности ($k = \overline{1, K}$);

6) вектор $\mathbf{h}_k$ по соотношениям (8), в прямой последовательности ($k = \overline{1, K}$);

7) матрицы $\mathbf{A}_k^{(i)}$ и векторы $\mathbf{b}_k^{(i)}$ (10), в обратной последовательности ($k = \overline{K, 1}$);

8) вектор независимых ускорений МС решением системы уравнений (11);

9) зависимые шарнирные ускорения по соотношениям (6), в прямой последовательности ($k = \overline{1, K}$);

10) силы и моменты, действующие на основание СтМ для всех тел преобразованной МС со структурой дерева.

Так как большинство зависимых КЦ не связано между собой непосредственно, то описанный выше подход приводит к формированию матриц $\mathbf{C}_k^{(d)}$, $\mathbf{C}_k^{(i)}$, $\mathbf{H}_k$, $\mathbf{A}_k^{(i)}$, $\mathbf{A}_k^{(id)}$, $\mathbf{A}_k^{(d)}$ с большим числом нулевых элемен-

тов. Избыточные вычисления с нулевыми операндами исключаются при реализации алгоритма в специализированной системе символьных преобразований.

Заключение

Предложен последовательный способ формирования уравнений контурных связей и использования их решений для редукции УД в замкнутой форме преобразованной МС на основе метода разделения обобщенных координат. Он позволяет учитывать произвольные разновидности кинематических контуров в классе СтМ. Получено аналитическое решение уравнений контурных связей относительно координат для основных типов зависимых кинематических цепей.

Список литературы

1. **ParalleMIC** — the Parallel Mechanisms Information Center. URL: <http://www.parallemic.org> (дата обращения: 04.09.2017)
2. **Бойков В. Г., Юдаков А. А.** Моделирование динамики систем твердых и упругих тел в программном комплексе EULER // Изв. РАН. Информационные технологии и вычислительные системы. 2001. № 1. С. 42—52.
3. **Горобцов А. С.** Формирование уравнений движения пространственной механической системы, содержащей кинематические цепи произвольной структуры // Машиностроение и инженерное образование. 2005. № 2. С. 46—54.
4. **Open Dynamic Engine.** Home page. URL: <http://www.ode.org> (дата обращения: 04.09.2017).
5. **Petzold L. R.** Computational challenges in mechanical system simulation // Computer-Aided Analysis of rigid and flexible Mechanical Systems. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1994. P. 483—499.
6. **Pogorelov D.** Differential-algebraic equations in multibody system modeling // Numerical algorithms. 1998. Vol. 19. P. 183—194.
7. **Rampalli R., Vikram Sohoni V., Steigerwald M. F., Joseph F. McGrath J. F.** Numerical Methods in ADAMS Mechanical Simulation Code. Mechanical Dynamics, Inc., 1990. 14 P.
8. **Ibrahim Z. B., Suleiman M., Othman K. I.** Direct block backward differentiation formulas for solving second order ordinary differential equations // Int. Journal of Mathematical, Physical, Electrical and Computer Engineering, 2008. Vol. 2, N. 2. P. 260—262.
9. **Baumgarte J. W.** Stabilization of Constraints and Integrals of Motion in Dynamic Systems // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1972. Vol. 1. P. 1—16.
10. **Горобцов А. С., Солоденков С. В.** Алгоритмы численного интегрирования уравнения движения систем тел с множителями Лагранжа // Машиностроение и инженерное образование. 2005. № 3. С. 20—27.
11. **Brandl H., Johanni R., Otter M.** An algorithm for the simulation of multibody systems with kinematical loops // Proc. of the 7th World Congress on The Theory of Machines and Mechanisms. Sevilla. 1987. Vol. 2. P. 407—411.
12. **Wicker J.** Dynamic behavior of spatial linkages: Exact equation of motion // Transaction of the ASME: Ser. B. 1969. Vol. 9, N. 1. P. 251—258.
13. **Wehage R. A., Haug J. E.** Generalized coordinate partitioning for dimension reduction in analysis of dynamical systems // Journal of Mechanical Design 1982. N. 104. P. 247—255.
14. **Яскевич А. В.** Уравнения динамики стыковочных механизмов. Часть 1. Алгоритмы для механических систем со структурой дерева // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 1. С. 58—64.

Dynamic Equations of Docking Mechanisms. Part 2. Algorithms for Kinematical Loops

A. A. Yaskevich, Andrey.Yaskevich@rsce.ru,

Rocket Space Corporation "Energia", Korolev, 141070, Russian Federation

Corresponding author: **Yaskevich Andrey V.**, Ph. D., Head of Department of Docking Systems,
Rocket Space corporation "Energia", 141070, Korolev, Russian Federation,
e-mail: Andrey.Yaskevich@rsce.ru

Accepted on September 19, 2017

From the point of view of a docking dynamical process, a multi-loop docking mechanism, in spite of its low mass, is a more complex mechanical system than a spacecraft. An approach providing high computational efficiency of dynamic simulation algorithms for such a class of mechanisms is considered in this paper. Before simulation, a multi-loop mechanical system is transformed to a tree structure using constrain equations instead of some joints. Each loop of a docking mechanism can be partitioned to a controlled and a dependent kinematical chains with independent and dependent joint variables, and constrain equations for its replaced joint are non-singular. This paper describes an application of the generalized coordinate partitioning method (GCPM), which specifies that dependent joint accelerations of the transformed mechanical system are expressed as a function of independent ones through matrixes, which are used to reduce the dimension of dynamic equations. All loops and dependent chains of a docking mechanism are numbered from outermost to innermost. In contrast to GCPM, constrain equations are formulated in the inverse sequence, i.e. starting with the maximum loop number, and for a current loop they incorporate all joint accelerations except previous loops. So, dependent joint accelerations of a current loop are expressed as a function of joint accelerations of all next loops. It allows reducing the dimension of dynamic equations regardless of various combinations of outer and inner kinematical loops of docking mechanisms. Redundant mathematical operations with zero matrix elements can be eliminated using symbolic manipulation system. For higher computational efficiency, analytical solutions of joint coordinates constrain equations are proposed for main types of dependent kinematical chains.

Keywords: spacecraft, docking mechanisms, dynamic equations, constrain equations, generalized coordinate partitioning method

For citation:

Yaskevich A. A. Dynamic Equations of Docking Mechanisms. Part 2. Algorithms for Kinematical Loops, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 2, pp. 139–144.

DOI: 10.17587/mau.19.139-144

References

1. **ParalleMIC** — the Parallel Mechanisms Information Center. Available at: <http://www.parallemic.org> (date of access 04.09.2017).
2. **Bojkov V. G., Judakov A. A.** Modelirovanie dinamiki sistem tverdyh i uprugih tel v programmnom komplekse EULER (Dynamic simulation of rigid and flexible body systems using EULER software), *Izv. RAN. Informaci-onnye tehnologii i vychislitel'nye sistemy*, 2001, no. 1, pp. 42–52 (in Russian).
3. **Gorobcov A. S.** Formirovanie uravnenij dvizheniya prostranstvennoj mehanicheskoy sistemy, *soderzhashhej kinematischeke cipi proizvol'noj struktury* (A generation of motion equations of mechanical system with arbitrary structure of kinematical chains), *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie*, 2005, no. 2, pp. 46–54 (in Russian).
4. **Open** Dynamic Engine. Home page. <http://www ode.org> (date of access 04.09.2017).
5. **Petzold L. R.** Computational challenges in mechanical system simulation, *Computer-Aided Analysis of rigid and flexible Mechanical Systems*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1994, pp. 483–499.
6. **Pogorelov D.** Differential-algebraic equations in multibody system modeling, *Numerical Algorithms*, 1998, vol. 19, pp. 183–194.
7. **Rampalli R., Vikram Sohoni V., Steigerwald M. F., Joseph F. McGrath J. F.** Numerical Methods in ADAMS Mechanical Simulation Code, Mechanical Dynamics, Inc., 1990, 14 p.
8. **Ibrahim Z. B., Suleiman M., Othman K. I.** Direct block backward differentiation formulas for solving second order ordinary differential equations, *Int. Journal of Mathematical, Physical, Electrical and Computer Engineering*, 2008, Vol. 2, no. 2, pp. 260–262.
9. **Baumgarte J. W.** Stabilization of Constraints and Integrals of Motion in Dynamic Systems, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1972, vol. 1, pp. 1–16.
10. **Gorobcov A. S., Solodnikov S. V.** Algoritmy chislennogo integrirvaniya uravneniya dvizheniya sistem tel s mnozhitel'nyimi Lagranzha (Numerical integration algorithms of body system motion equations with Lagrangian coefficients), *Mashinostroenie i Inzhenernoe Obrazovanie*, 2005, no. 3 pp. 20–27. (in Russian).
11. **Brandl H., Johanni R., Otter M.** An algorithm for the simulation of multibody systems with kinematical loops, *Proceedings of the 7th World Congress on The Theory of Machines and Mechanisms*, Sevilla, 1987, vol. 2, pp. 407–411.
12. **Wicker J.** Dynamic behavior of spatial linkages: Exact equation of motion, *Transaction of the ASME: Ser. B*, 1969, vol. 9, no. 1, pp. 251–258.
13. **Wehage R. A., Haug J. E.** Generalized coordinate partitioning for dimension reduction in analysis of dynamical systems, *Journal of Mechanical Design*, 1982, no. 104, pp. 247–255.
14. **Yaskevich A. V.** Uravneniya dinamiki stykovochnykh mekhanizmov. Chast 1. Algoritmy dlja mehanicheskikh sistem s drevovidnoj strukturoj (A dynamic equations of docking mechanisms. Part 1. Algorithms for mechanical systems with tree structure), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 1, pp. 58–64 (in Russian).

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромынский пер., 4

Телефон редакции журнала: (499) 269-5397, тел./факс: (499) 269-5510

Технический редактор Е. В. Конова. Корректор З. В. Наумова.

Сдано в набор 24.11.2017. Подписано в печать 16.01.2018. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН218. 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 солюнз". Отпечатано в ООО "Авансд солюнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.

Рисунки к статье Е. С. Брискина, Н. Г. Шаронова, В. С. Барсова
**«ОБ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМАХ ДВИЖЕНИЯ РОБОТОВ
 С ПОВОРОТНО-ЗАКЛИНИВАЮЩИМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ»**



a)



б)

Рис. 1. Шагающая машина для
 лесозаготовок «Plustech» (a)
 и дождевальная машина «Кубань»
 с шагающими двигателями (б)



Рис. 2. Робот,
 перемещающийся по
 деревьям (Scion)

Рисунок к статье Т. М. Волосатовой, А. В. Козова
**«ОСОБЕННОСТИ МЕТОДОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ В АВТОМАТИЧЕСКОЙ
 СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ПОВОРОТОМ МОБИЛЬНОГО РОБОТА»**



1

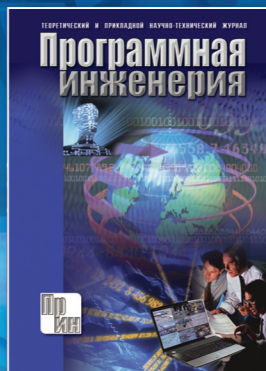


2

Рис. 3. Примеры сгенерированных тестовых изображений:

1 – изображение с объектом, который необходимо распознать; 2 – изображение без распознаваемого объект

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.

Подписные индексы по каталогам: «Роспечать» – 22765; «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.

Подписные индексы по каталогам: «Роспечать» – 72656; «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.

Подписные индексы по каталогам: «Роспечать» – 79963; «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.

Подписные индексы по каталогам: «Роспечать» – 79493; «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