

КИБЕРНЕТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

CYBERNETICS AND COMPUTER ENGINEERING

Выпуск 177

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в 1965 г.

Периодичность: 4 раза в год

КИЕВ 2014

СОДЕРЖАНИЕ

Интеллектуальное управление и системы

<i>Gubarev V.F., Gummel A.V., Melnichuk S.V.</i> Well-Posed Identification of Nuclear Type Infinite and Multidimensional Systems	5
<i>Губарев В.Ф., Гуммель А.В., Мельничук С.В.</i> Корректная идентификация бесконечномерных систем ядерного типа и многомерных систем	5
<i>Бабий Н.А., Волосов В.В., Шевченко В.Н.</i> Внешние эллипсоидальные аппроксимации множеств достижимости динамических систем	16
<i>Копец М.М.</i> Оптимальное управление колебаниями прямоугольной мембраны	28
<i>Павлова С.В., Богачук Ю.П., Мельников С.В., Господарчук А.Ю.</i> Организация эффективного обмена данными в сетевых системах управления динамическими объектами	43

Информатика и информационные технологии

<i>Кальниш В.В., Швец А.В.</i> Информационная технология психофизиологического обеспечения высокой надежности операторской деятельности	54
---	----

Медицинская и биологическая кибернетика

<i>Grigoryan R.D.</i> A Formal Analysis of Mechanisms Increasing Arterial Pressure.....	68
<i>Григорян Р.Д.</i> Формализованный анализ механизмов повышения артериального давления	68
<i>Кнышов Г.В., Руденко А.В., Настенко Е.А., Яковенко А.В., Сиромеха С.О., Галич С.С.</i> Особенности проектирования медицинской информационной системы поддержки принятия решений, основанной на интеллектуальном анализе данных.....	79

Abstracts	88
------------------------	----

Авторы номера	99
----------------------------	----

УДК 681.5 + 621.391:01

В журнале представлены результаты исследований в области теории и практики интеллектуального управления, информационных технологий, а также биологической и медицинской кибернетики.

Для научных работников, инженеров, аспирантов и студентов вузов соответствующих специальностей.

У журналі надано результати досліджень у галузі теорії та практики інтелектуального керування, інформаційних технологій, а також біологічної та медичної кібернетики.

Для наукових співробітників, інженерів, аспірантів і студентів вузів відповідних спеціальностей.

The results of research in the field of theory and practice of information technologies, intellectual control, biological and medical cybernetics are presented.

It is intended for researchers, practical engineers, post-graduate students of corresponding specialities.

Редакционная коллегия

И.В. Сергиенко, акад. НАНУ, д.ф.-м.н., проф. (главный редактор),

В.И. Гриценко, к.т.н., проф. (главный редактор),

Л.М. Козак, д.б.н. (заместитель главного редактора),

Н.Л. Дробышева, к.филол.н. (ответственный секретарь).

Технические науки: Гаращенко Ф.Г., д.т.н., проф. (Киев), Губарев В.Ф., д.т.н., чл.-к. НАНУ, (Киев), Hänßgen Klaus, prof. (Leipzig, Germany), Кунцевич В.М., д.т.н., акад. НАНУ (Киев), Павлов В.В., д.т.н., проф. (Киев), Тимофеева Н.К., д.т.н. (Киев), Файнзильберг Л.С., д.т.н. (Киев).

Физико-математические науки: Анисимов А.В., д.ф.-м.н., чл.-к. НАНУ (Киев), Глибовец Н.Н., д.ф.-м.н., проф. (Киев), Гупал А.М., д.ф.-м.н., чл.-к. НАНУ (Киев), Модрухович Б.Ш., д.ф.-м.н., проф. (Detroit, USA), Онопчук Ю.Н., д.ф.-м.н., проф. (Киев), Ченцов А.Г., д.ф.-м.н., чл.-корр РАН (Екатеринбург, Россия), Чикрий А.А. д.ф.-м.н., чл.-к. НАНУ (Киев), Шлезингер М.И., д.ф.-м.н., проф. (Киев).

Медицинские науки: Белов В.М., д.м.н., проф. (Киев), Бычков В.В. д.м.н. (Киев), Ganushchak Yuri, MD, PhD (Maastricht, Netherlands), Годлевский Л.С., д.м.н., проф. (Одесса), Голубчиков М.В., д.м.н., проф. (Киев), Коваленко А.С., д.м.н., проф. (Киев), Майоров О.Ю., д.м.н., проф. (Харьков).

Биологические науки: Антомонов М.Ю., д.б.н., проф. (Киев), Кальниш В.В., д.б.н., проф. (Киев), Кифоренко С.И., д.б.н. (Киев), Книгавко В.Г., д.б.н., проф. (Харьков), Котова А.Б., д.б.н., проф. (Киев), Лябах Е.Г., д.б.н. (Киев), Navakatikyan Michael, PhD, BSc (Australia).

Научные разделы:

Информатика и информационные технологии

Интеллектуальное управление и системы

Медицинская и биологическая кибернетика

Журнал «Кибернетика и вычислительная техника» включен в перечень профильных изданий ВАК Украины по техническим, биологическим, медицинским и физико-математическим наукам.

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Утверждено к печати ученым советом

Международного научно-учебного центра

информационных технологий и систем НАН Украины

и Министерства образования и науки Украины (протокол №9 от 12.09.2014)

План выпуска 2014 г.

Адрес редколлегии:

03680 Киев ГСП, просп. Академика Глушкова, 40

Международный научно-учебный центр

информационных технологий и систем НАН Украины

и Министерства образования и науки Украины

Тел: 503 95 62. E-mail: kvt@irtc.org.ua www.kvt.irc.org.ua

Редактор *Н.Л. Дробышева*. Компьютерная верстка *А.В. Тупальский*

Свидетельство о государственной регистрации КВ № 12649-1533Р от 14.05.2007

КИБЕРНЕТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

CYBERNETICS AND COMPUTER ENGINEERING

Issue 177

SCIENTIFIC JOURNAL

Founded in 1965

Periodicity: 4 issues per year

KIEV 2014

TABLE OF CONTENTS

Intellectual Control and Systems

<i>Gubarev V.F., Gummel A.V., Melnychuk S.V.</i> Well-Posed Identification of Nuclear Type Infinite and Multidimensional Systems	5
<i>Babii N.A., Volosov V.V., Shevchenko V.M.</i> External Ellipsoidal Approximation of Reachable Sets of Dynamic Systems	16
<i>Kopets M.M.</i> Optimal Control by Vibrations of a Rectangular Membrane.....	28
<i>Pavlova S.V., Bohachuk Yu.P., Melnikov S.V., Gospodarchuk O.Yu.</i> A Way to Organize Effective Data Exchange in Network-Based Control System for Dynamic Objects.....	43

Informatics and Information Technologies

<i>Kalnysh V.V., Shvets A.V.</i> Information Technology of Psychophysiological Maintenance of Operator's Activity High Reliability	54
--	----

Biological and Medical Cybernetics

<i>Grygoryan R.D.</i> A Formal Analysis of Mechanisms Increasing Arterial Pressure.....	68
<i>Knishov G.V., Rudenko A.V., Nastenko E.A., Yakovenko A.V., Siromaha S.O., Galych S.S.</i> Design Features of the Medical Information Decision Support System Based on Data Mining.....	79

Abstracts	88
------------------------	----

Our authors	99
--------------------------	----

КІБЕРНЕТИКА ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

CYBERNETICS AND COMPUTER ENGINEERING

Випуск 177

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ
Заснований у 1965 р.
Періодичність: 4 рази на рік

КИЇВ 2014

ЗМІСТ

Інтелектуальне керування та системи

- Губарев В.Ф., Гуммель О.В., Мельничук С.В.* Коректна ідентифікація нескінченновимірних та багатовимірних систем ядерного типу..... 5
- Бабій Н.А., Волосов В.В., Шевченко В.М.* Зовнішні еліпсоїдальні апроксимації множин досяжності динамічних систем..... 16
- Копець М.М.* Оптимальне керування коливаннями прямокутної мембрани..... 28
- Павлова С.В., Богачук Ю.П., Мельников С.В., Господарчук О.Ю.* Організація ефективного обміну даними в мережкових системах керування динамічними об'єктами 43

Інформатика та інформаційні технології

- Кальниш В.В., Швець А.В.* Інформаційна технологія психофізіологічного забезпечення високої надійності операторської діяльності 54

Медична та біологічна кібернетика

- Григорян Р.Д.* Формальний аналіз механізмів підвищення артеріального тиску..... 68
- Книшов Г.В., Руденко А.В., Настенко Є.А., Яковенко А.В., Сіромаха С.О., Галич С.С.* Особливості проектування медичної інформаційної системи підтримки прийняття рішень, заснованої на інтелектуальному аналізі даних..... 79

- Abstracts** 88

- Інформація про авторів** 99

Системы и интеллектуальное управление

УДК 681.5

WELL-POSED IDENTIFICATION OF NUCLEAR TYPE INFINITE AND MULTIDIMENSIONAL SYSTEMS

V.F. Gubarev, A.V. Gummel, S.V. Melnychuk

Space Research Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine, Kiev, Ukraine

Рассмотрены проблемы моделирования и идентификации сложных динамических систем. Для задач структурно-параметрической идентификации на основе описания в виде бесконечных разложений установлены и исследованы условия, при которых эти задачи являются корректно поставленными, а когда их решения становятся неустойчивыми и, следовательно, практически непригодными. Полученные результаты являются фундаментальными и дают более глубокое понимание процесса идентификации.

Ключевые слова: системная идентификация, некорректно-поставленная задача, конечно-частотная идентификация, идентификация на основе выделения ортогонального подпространства (4SID), регуляризация.

Розглянуто проблеми моделювання та ідентифікації складних динамічних систем. Для задач структурно-параметричної ідентифікації на основі опису у вигляді нескінченних розкладів встановлено та досліджено умови, за яких ці задачі є коректно поставленими, а коли їх розв'язки стають нестійкими і, отже, практично непридатними. Отримані результати є фундаментальними і дають більш глибоке розуміння процесу ідентифікації.

Ключові слова: системна ідентифікація, некоректно-визначена задача, кінцево-частотна ідентифікація, ідентифікація на основі виділення ортогонального підпростору (4SID), регуляризація.

INTRODUCTION

System identification problems belong to a class of inverse problems which have the feature that under certain conditions its solutions become unstable i.e. sensitive to the errors in input data. Especially it takes place in multidimensional cases when it is necessary to assume a model set which adequately represents the original system, then select a model order and find other parameters using only general information about unknown plant. Processes in such system may be so complex that on the base of fundamental laws and theoretical results it is often impossible to define even the model set which includes a model that completely describes the system that generates data. Also it is supposed that there is a causation between finite input and output of a plant. The only possible way in such cases is to use different infinite-dimensional expansion as model set [1, 2].

Computational mathematic methods serve as a foundation of such approach (e.g. Galerkin method and other iterational methods, methods based on Green function or impulse response for system with disturbed or lumped parameters [3–5]).

Example of such complicated system is a heating processes in power station. Fuel supply that affects vapor parameters is considered as an input. Processes of burning, heating and vaporizing are so complex that it is impossible to describe them in any other way besides approach proposed above, that is using infinite-dimensional model which links input (fuel supply) and output (vapor parameters). In this case input-output map is an impulse response that induces nuclear Hankel operator or equivalent non-rational transfer function.

The approximation of infinite-dimensional linear system by finite-dimensional ones is a subject of interest in a mathematical theory. In [2] using output normal realization the convergence of the finite-dimensional approximation to precise model was proven and error bounds on the truncated realization were given. These results are important for model reduction problem, i.e. conversion of the complex infinite-dimensional description into simple low-dimensional model [6].

In identification problem the reduced model order selection is defined primarily by the well-posedness, for which it is necessary to satisfy conditions providing the stability of the solution with respect to errors in the initial data. In this sense truncated model order will be the main regularization parameter which means that the dimension of rational approximation should be in agreement with the errors in available data. Hence regularization procedure should be incorporated in the existing methods of identification allowing to find the stable solution and to extend model order when errors tend to zero.

This paper shows how this problem may be solved correctly with selection of highest model order admissible by stability conditions using two popular identification methods. Besides numerous computational experiments that were conducted allowed us to clarify a cause of ill-posedness which is an essential to identification problem. Fundamental properties of the regularized solutions are established irrespectively to identification method used for plant that generated output data.

Systems with single input and single output (SISO) are considered because even in this case nontrivial results were revealed.

PROBLEM SETTING

For infinite-dimensional nuclear type linear SISO systems model set can be written as

$$\dot{x} = Ax + bu + \xi, y = cz + \eta, \quad (1)$$

where A is a linear operator mapping between infinite-dimensional linear vector spaces, b is a linear operator mapping one-dimensional space into infinite-dimensional one, c is a projecting operator. Under suitable assumptions they lead to existence of a non-rational transfer function $G(s) = c(sI - A)b$. Values ξ and η denote unknown perturbation in input and noise in output that may be present in real system.

Description (1) be also appropriate for multi-dimensional case when system

has finite but large and unknown dimension. In this case A is a matrix, b, c are vectors and transfer function is a rational. Such system is also a nuclear type if it eigenvalues belong to left half-plane.

Let description (1) be proper for unknown real system, i.e. is a nuclear type and (1) includes true model. It is required to find the finite-dimensional matrix A and vectors b, c using experimental data $(y(t), u(t))$ that would provide a rational approximation of the real system described by (1) so that difference between system output and model output would be either in accordance with errors ξ, η or defined by stability condition of the solution. In other words it means to solve identification problem correctly. For finite multidimensional case it means to construct the model with significantly less dimension than dimension of the real system. Here is a full analogy with so-called model reduction problem [6]. In this case rational approximation (1) can be represented as

$$\dot{x} = A_n x + b_n u, y = c_n^T x, \quad (2)$$

where A_n is a matrix $n \times n$, b_n is a column-vector, c_n^T is a row-vector (T is a transposition).

FINITE-FREQUENCY IDENTIFICATION WITH REGULARIZATION

Model reconstruction using Frequency method of identification is realized on frequency domain parameters, extracted from experimentally measured output when input is excited by the harmonic test signal. The classical frequency approach has a long history and here we don't give the review of these methods because readers can find it for example in the paper [7]. We note that in recent years the methods were significantly developed by Alexandrov and Orlov, see [7–11].

If (2) will be written in the form of Jordan realization it is easy to get the following input-output relation

$$y(t) = \sum_{q=1}^Q g_q \int_0^t e^{-\lambda_q(t-\theta)} u(\theta) d\theta + \sum_{p=1}^P \int_0^t e^{-\alpha_p(t-\theta)} \left[f_p^c \cdot \cos \beta_p(t-\theta) + f_p^s \cdot \sin \beta_p(t-\theta) \right] u(\theta) d\theta. \quad (3)$$

For simplicity sake here it is accepted that initial state under t_0 is zero: $t_0 = 0$; eigenvalue multiplicity is missing; Q is a number of real and P is a number of complex-valued eigenvalues with $\lambda_q \geq 0, \alpha_p \geq 0$. Besides

$$\begin{aligned} g_q &= c_{nq} b_{nq}, & q &= 1, Q \\ f_p^c &= c_{np}^c b_{np}^c + c_{np}^s b_{np}^s, \\ f_p^s &= c_{np}^c b_{np}^s - c_{np}^s b_{np}^c, & p &= 1, P \end{aligned} \quad (4)$$

c_{nq} and b_{nq} are components of the vectors b_n and c_n for real eigenvalues and

$c_{np}^c, c_{np}^s, b_{np}^c, b_{np}^s$ are components of these vectors corresponding Jordan block

$$\begin{bmatrix} -\alpha_p & \beta_p \\ -\beta_p & -\alpha_p \end{bmatrix}.$$

From equations (4) it is possible to select different canonical form. For example, assuming $b_{nq}=1, b_{np}^c=1, b_{np}^s=0$ we receive the control canonical realization and for $c_{nq}=1, c_{np}^c=1, c_{np}^s=0$ we have observable canonical realization. By analogy balanced realization may also be obtained.

In frequency method the system and model inputs are usually excited by polyharmonic signal with K sinusoids of different frequencies ω_k and amplitudes u_k :

$$u(t) = \sum_{k=1}^K u_k \sin \omega_k t, \quad t \geq 0. \quad (5)$$

For sample data the regression equation is derived if substitute (5) in (3) and integrate. As result we obtain

$$\begin{aligned} y(t) = & \sum_{k=1}^K u_k \left\{ \sum_{q=1}^Q \frac{\omega_k g_q}{\lambda_q^2 + \omega_k^2} e^{-\lambda_q t} + \right. \\ & + \sum_{p=1}^P \left[(\gamma_3 f_p^c + \gamma_2 f_p^s) \sin \beta_p t + (\gamma_2 f_p^c - \gamma_3 f_p^s) \cos \beta_p t \right] e^{-\lambda_p t} + \\ & + \left[\sum_{q=1}^Q \frac{\lambda_q g_q}{\lambda_q^2 + \omega_k^2} + \sum_{p=1}^P (\gamma_1 f_p^c + \gamma_4 f_p^s) \right] \sin \omega_k t + \\ & \left. + \left[\sum_{q=1}^Q \frac{\omega_k g_q}{\lambda_q^2 + \omega_k^2} + \sum_{p=1}^P (\gamma_2 f_p^c - \gamma_3 f_p^s) \cos \omega_k t \right] \right\}, \quad (6) \end{aligned}$$

where $Q + 2P = n$,

$$\gamma_1 = \gamma_1(\alpha_p, \beta_p, \omega_k) = \frac{\alpha_p}{\alpha_p^2 + (\omega_k + \beta_p)^2} + \frac{\alpha_p}{\alpha_p^2 + (\omega_k - \beta_p)^2},$$

$$\gamma_2 = \gamma_2(\alpha_p, \beta_p, \omega_k) = \frac{\omega_k + \beta_p}{\alpha_p^2 + (\omega_k + \beta_p)^2} + \frac{\omega_k - \beta_p}{\alpha_p^2 + (\omega_k - \beta_p)^2},$$

$$\gamma_3 = \gamma_3(\alpha_p, \beta_p, \omega_k) = \frac{\alpha_p}{\alpha_p^2 + (\omega_k + \beta_p)^2} - \frac{\alpha_p}{\alpha_p^2 + (\omega_k - \beta_p)^2},$$

$$\gamma_4 = \gamma_4(\alpha_p, \beta_p, \omega_k) = \frac{\omega_k + \beta_p}{\alpha_p^2 + (\omega_k + \beta_p)^2} - \frac{\omega_k - \beta_p}{\alpha_p^2 + (\omega_k - \beta_p)^2}.$$

When $Q, P, \lambda_q, \alpha_p, \beta_p$ are known formula (6) becomes linear regression which can be used for g_q, f_p^c, f_p^s determination. In this regard three stages of identification

are proposed. At first maximal admissible by stability condition Q^* and P^* are defined. In other words a solution of the identification problem for Q^* and P^* should be weakly sensitive to errors in available data and further increase of order n will lead to scattering of the estimated parameters. Then Q and P may be considered as a regularization parameters. Here we have analogy with function recovery problem which is given in the form of approximately defined coefficients of Fourier expansion. At the second stage eigenvalues (i.e. $\lambda_q, \alpha_p, \beta_p$) are calculated for known model order. At the final stage parameters g_q, f_p^c, f_p^s are estimated from equations (4) using linear regression and then coefficients $b_{nq}, b_{np}^s, b_{np}^c, c_{nq}, c_{np}^s, c_{np}^c$ that correspond to Jordan realization in suitable canonical form are founded.

For finding solution on the first and second stages it is proposed to use the well known equations of the frequency identification method [7]

$$V(j\omega_k) - (\Phi_k + j\Psi_k)W(j\omega_k) = 0, k = \overline{1, K}, \quad (7)$$

where $j = \sqrt{-1}$, $G(j\omega_k) = \frac{V(j\omega_k)}{W(j\omega_k)}$ and

$$V(j\omega_k) = (j\omega_k)^{n-1}v_{n-1} + (j\omega_k)^{n-2}v_{n-2} + \dots + j\omega_k v_1 + v_0,$$

$W(j\omega_k) = (j\omega_k)^n w_n + (j\omega_k)^{n-1} w_{n-1} + \dots + j\omega_k w_1 + w_0$ are analytical expressions for numerator and denominator of transfer function represented as frequency response, $\Phi_k + j\Psi_k$ is a value of transfer function on imaginary axis which may be evaluated from measured in experiment output $y(t)$ according to [7, 9]

$$\Phi_k(\tau) = \frac{2}{u_k} \int_0^\tau y(t) \sin \omega_k t dt, \quad \Psi_k(\tau) = \frac{2}{u_k} \int_0^\tau y(t) \cos \omega_k t dt, \quad k = \overline{1, K}. \quad (8)$$

For large but finite τ Φ_k and Ψ_k are determined with errors. If $\tau \rightarrow \infty$ Φ_k and Ψ_k tend to precise values when certain requirements to the choice of ω_k are realized [7, 9]. Besides correct identification on the base (7) is achieved when $K \geq n$. Then using corresponding part equations of (7) parameters v_i ($i = \overline{0, n-1}$) may be expressed through w_i ($i = \overline{0, n}$) and after that we eliminate v_i from remaining equations. This procedure is correct because the relevant linear system equations has a Vandermonde determinant, composed from different ω_k only, i.e. it is a nonsingular and may be computed exactly. Details of this procedure one can find in paper [12]. Here we write the final result namely the linear equation of the system with respect to vector $w = (w_0, w_1, \dots, w_n)$:

$$Hw = g, \quad (9)$$

where matrix H and g on the right side have a complicated dependence on Φ_k , Ψ_k , ω_k that is $H = H(\Phi_k, \Psi_k, \omega_k)$, $g = g(\Phi_k, \Psi_k, \omega_k)$. Their expressions are given in [12]. Large finite τ provides approximate Φ_k , Ψ_k . As a result system (9) has given approximate matrix H and right hand side of equation. Nuclear type systems generate the data which lead to ill-conditionality of the matrix H even for not large n , i.e. the problem (9) becomes ill-posed for multidimensional model. It was established in [12] that solution of (9) will be stable if

$$k(H) \left(\varepsilon_c + \frac{1 + \varepsilon}{\tau} \right) < 1, \quad (10)$$

where $k(H)$ is a matrix H condition number; ε is a boundary (or variance) for noise and perturbation; ε_c defines level of computational error. Detailed researches of the solution stability problem were realized by means of numerical experiments. Wide class of systems with different structure parameters and noise have generated data for identification which thereupon were utilized in algorithms that estimates $\hat{\Phi}$, $\hat{\Psi}$ and matrix H . Model order n and therefore a dimension of a system equation (9) was significant parameter. So matrix H and vector g were computed for different n , i.e. we formed set of H_n and g_n for different n . Condition number of the matrices obtained in numerical experiments is evaluated by SVD decomposition

$$H_n = U_n \Sigma_n V_n^T, \quad (11)$$

where U_n , V_n are orthogonal matrices and Σ_n is a diagonal matrix with the singular values in non-increasing order on the diagonal. Then matrix H_n condition number in spectral norm $\|\cdot\|_2$ is defined by expression

$$\kappa_2(H_n) = \frac{\sigma_1(H_n)}{\sigma_n(H_n)}, \quad (12)$$

where σ_1 is the first and σ_n is the last singular values. Typical for nuclear type system dependence $\kappa_2(H_n)$ from approximate model order n illustrates Fig. 1. Increase of the model dimension on unit leads approximately to two order $\kappa_2(H_n)$ enlargement.

Now we address the stability problem that is how to determine the regularized solution of the identification problem. As it was said before model order n is regarded as regularization parameter. However it is more convenient to use condition number for numerical modeling of identification process instead n since condition number is roughly linked with n for each concrete system. In this case condition number may represent the class of system even with different n .

Estimations of $\hat{\Phi}$ and $\hat{\Psi}$ depend on observation interval τ . Obviously this dependence become tangible when τ is changed exponentially. So it is appropriate

to choose discrete time τ_k as $\tau_k = 10^k \tau_0$ where τ_0 is initial proper observation interval.

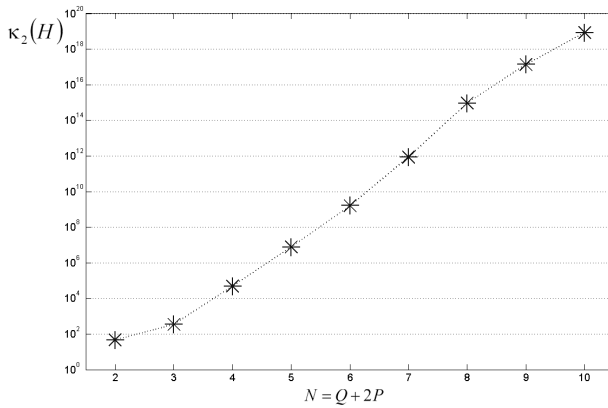


Fig. 1. Condition number values for approximate models of different order

We exploit small interval $[\tau_k, \tau_k + \Delta_k]$ near each τ_k for data collection and estimations of $\hat{\Phi}$ and $\hat{\Psi}$. We use set of matrices H obtained from these data for stability analysis. We can judge about appearing unstable solution by the scattering of eigenvalues obtained from equation $W(s) = 0$ with coefficients w_i ($i = \overline{1, n}$) calculated according to system (9). Fig. 2 summarizes the results of multiple numerical experiments for data generating systems with different structures and parameters. On plane of two parameters $\kappa_2(H)$ and τ are shown the stability domain A , range C where all systems were unstable and transition domain B where part of the systems provide the stable solution and another are unstable. Further τ increase leads to curves merging and after that joint curve tend to saturation that is explained by dominant influence of computational errors. As a result even for precise Φ, Ψ models with order $Q + 2P > 11$ lie in unstable domain. For models from transition domain the checking test on stability is required.

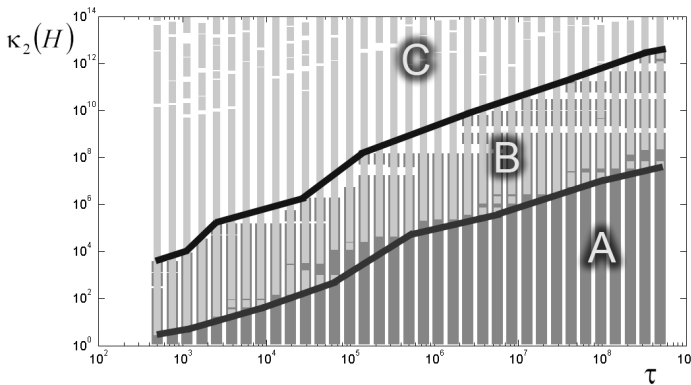


Fig. 2. Solution stability domains for frequency identification

REGULARIZED SUBSPACE (4SID) IDENTIFICATION METHOD

To build a finite-dimensional model of a plant with a modification of the 4SID method difference approximation of system (1) was selected as a model set. This model set may be written as

$$x_{t+1} = Ax_t + bu_t, \quad y_t = c^T x_t, \quad (13)$$

where A is a matrix $\alpha \times \alpha$, b is a vector $\alpha \times 1$, c^T is a vector $1 \times \alpha$, α is a model dimension, discretization Δt is fitted so that $\lim_{\alpha \rightarrow \infty} \Delta t = 0$, i.e. description

(13) should in limit lead to result coinciding with continuous approximation.

Subspace identification is a well developed method and description of it may be found for example in [13, 14]. Here we consider simplified version. Let input u_t be excited by square wave-form oscillator alternating with relaxation intervals

$$u_t = \begin{cases} u_i, & t \in S_{2i} \\ 0, & t \in S_{2i+1} \end{cases}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N, \quad (14)$$

where S_0, S_2, \dots are exiting intervals, S_1, S_3, \dots are relaxation intervals. All S_{2i+1} ($i = 0, 1, \dots, N$) have equal length M and duration of S_{2i} ($i = 0, 1, \dots, N$) may be varied. Hankel matrix Y is formed from M measurements $y_{2i+1,1}, y_{2i+1,2}, \dots, y_{2i+1,M}$ on each relaxation interval

$$Y = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{31} & \dots & y_{2N+1,1} \\ y_{12} & y_{32} & \dots & y_{2N+1,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{1M} & y_{3M} & \dots & y_{2N+1,M} \end{pmatrix}.$$

By analogy we form matrix X from vectors x_{2i+1} relevant to origin of each relaxation interval

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{31} & \dots & x_{2N+1,1} \\ x_{12} & x_{32} & \dots & x_{2N+1,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{1M} & x_{3M} & \dots & x_{2N+1,M} \end{pmatrix},$$

where $x_{2i+1,k}$, $k = \overline{1, \alpha}$ is a component of vector x_{2i+1} . Due to equations (13) and specifics of the matrix X , Y the following matrix equation may be written [13, 14]

$$Y = \Gamma_{M+1} \cdot X, \quad (15)$$

where $\Gamma_{M+1} = \begin{bmatrix} c^T \\ c^T A \\ \vdots \\ c^T A^M \end{bmatrix}$ is an observability matrix.

According to realization theory if $Y = Y_1 \cdot Y_2$ is any given full-rank factorization of the Hankel matrix, then Y_1 is the observability matrix and Y_2 is the matrix of initial state on the relaxation intervals for some state-space realization. Optimal way for realization of such factorization is to use SVD decomposition. Let the SVD of Y be given by

$$Y = Q\Sigma V^T, \quad (16)$$

where Q and V are orthogonal matrices and Σ is a diagonal matrix with singular values in non-increasing order on the diagonal. If the data generating system is n order, then in the ideal case (all y_m^{2i+1} are precisely given) Y is of rank n , so that only the n first singular values are non-zero provided that $\alpha \geq n, M > n, N > n$. But in reality instead of precise Y we would have a matrix $\tilde{Y} = Y + Z$, where Y is a true matrix and Z is a matrix produced by perturbation of input and output noise. Then all singular values of matrix Σ will be positive. For multidimensional or infinite-dimensional systems condition number is evaluated as a ratio of singular values that grows exponentially when α incremented by one. So SVD decomposition (16) we write as follows

$$Y = Q_n \Sigma_n V_n^T + Q_r \Sigma_r V_r^T, \quad (17)$$

where $Q = (Q_n \ Q_r)$, $V = (V_n, V_r)$, $\Sigma = \begin{pmatrix} \Sigma_n & 0 \\ 0 & \Sigma_r \end{pmatrix}$.

In the framework of statistical approach for finite-dimensional system the first term corresponds to a “signal” and the second is a “noise”. It is clear that $\Sigma_r = 0$ in the absence of errors. So the dimension of Σ_n defines first of all the system order n . In our case due to ill-conditioning of the matrix Y_n (first term) for large (or even for not large) n we consider partition (17) as regularization procedure. First term with maximal n defines the maximum order of approximate model when identification still gives the stable solution. Unlike to statistical approach the model order estimation depends on value $\|\tilde{Y} - Y\|$. When $\|\tilde{Y} - Y\| \rightarrow 0$, then following tendency holds $n \rightarrow n^*$, where n^* is an order of a model that corresponds to deterministic case. Value n^* is entirely defined by inevitable computational errors.

If partition in (17) is made correctly, which means the order of approximate model satisfy the stability condition, the next step is to find the model parameters. By setting $\Gamma_{n-1} = Q_n$ the matrix A for some realization can be obtained from the matrix equation

$$\Gamma_{1:M} \cdot A = \Gamma_{2:M+1}, \quad (18)$$

where $\Gamma_{2:M+1}$ is a submatrix derived from Γ_{M+1} crossing out the first row and $\Gamma_{1:M}$ is a submatrix derived from Γ_{M+1} crossing out the last row.

In non-singular case system in (18) is overdetermined and a least-squares or a total least-squares methods to solve the system with respect to A can be used. After obtaining matrix A from (18) we find its eigenvalues that allows to write matrix A in Jordan realization. For canonical controllable realization vector b is given and only vector c should be found. When canonical observable realization is preferable, then vector b should be found with given vector c . With given A and b from first equation in (13) and (14) it is easy to calculate x_t in each point t of the observation interval. Then the second equation in (13) allows to find vector c from overdetermined linear system of equations with y_t measured in experiment for the same input. Here we remark that problem estimation of c is more stable in comparison with determination of the matrix A eigenvalues. It means that well-posedness of the identification problem under consideration is completely defined by the splitting procedure (17) that is choice of term $Q_n \Sigma_n V_n^T$. Multiple numerical experiments show that condition number depends on n in just the same way as it reports in Fig. 1.

Stability property in dependence on n was studied by numerical modeling. Two main parameters define the solution stability, namely, $\varepsilon = \|\tilde{Y} - Y\|$ and condition number κ_2 for spectral norm of the matrix $Q_n \Sigma_n V_n^T$, i.e. $\kappa_2(Q_n \Sigma_n V_n^T) = \frac{\sigma_1}{\sigma_n}$ where σ_1 is the first and σ_n is the last singular values of the matrix Σ_n . Instead of regularization parameter n we choose κ_2 on the same reason that was pointed out for frequency method. So the plane of these two parameters ε and κ_2 was used for demonstration of stability result obtained in multiple experiments with different system structures and parameters generating the data.

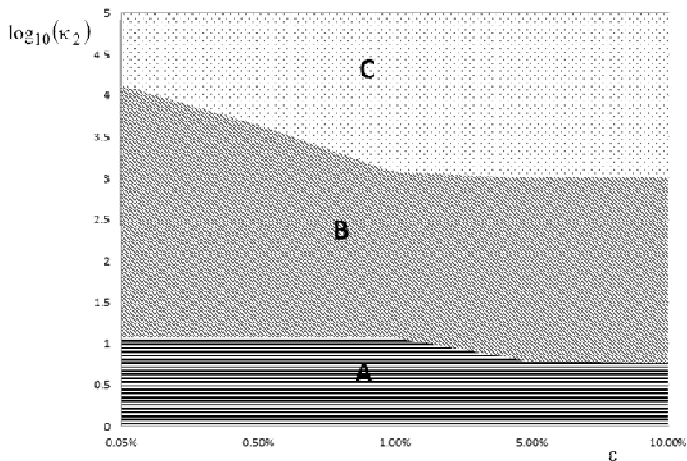


Fig. 3. Solution stability domains for subspace identification method

Domain A in Fig. 3 conforms to stability and C is unstable region. Between them transition zone B is located where part of the identified models are stable and the other are unstable. Here as in Fig. 2 the additional stability test is required

to use, for example set of data obtained by randomization. Fig. 2 and Fig. 3 can be used for model construction of reduced order or maximal order assumed by stability condition.

CONCLUSIONS

Identification problems of infinite or multidimensional systems may be fully treated as essentially ill-posed. Because of using only measured in experiment inaccurate data in many cases we not only look for a solution of the operator equation but also an operator itself. Hence the problem arises how to write the model set that includes true model of a plant. In such situation we propose in capacity of model set to represent it in the form of infinite expansion and to find finite approximation consistent with errors in available data using for this regularization. In other words the identification problem in such setting is always ill-posed. It is shown that this property is fundamental regardless what kind of method is applied.

It should be pointed out that approximate model obtained in identification is similar to real system with respect to output only. Moreover model parameters (eigenvalues and others) can essentially differ from the same parameters of the real system. For example, in most experiments each model eigenvalue represent whole cluster of system eigenvalues, i.e. is determined as averaged estimation.

It is also worse mentioning also about ill-posed identification of the finite-dimensional systems. All systems generating data with order corresponding to domain C in Fig. 2 and Fig. 3 lead to ill-posed identification. For such systems only approximate model of less order than at original system may be reconstructed.

1. Funrman P.A. *Linear Systems and Operators in Hilbert Space*. McGraw-Hill, New York. 1981. 476 p.
2. Glover K., Curtain R.F., Partington J.R. Realization and Approximation of Linear Infinite-Dimensional Systems with Error Bounds. *SIAM Journal Control and Optimization*, 1988, vol. 26, no. 4, pp. 863–897.
3. Gubarev V.F. Problem-oriented identification and control in the system with distributed parameters. *Problems of Control and Informatic*, 2000, no. 3, pp. 26–37 (in Russian).
4. Gubarev V.F. Rational approximation of the system with distributed parameters. *Cybernetic and system analysis*, 2008, no. 2, pp. 99–116 (in Russian).
5. Gubarev V., Zhukov O. Rational Approximation and Identification of Distributed Parameter Systems. *Proceedings of the 17-th World Congress IFAC. July 6–11 2008*. Seoul, Korea, pp. 6452–6457 (in Russian).
6. Antoulas A.C., Sorensen D.C., Gugercin S. A survey of model reduction methods for large-scale systems. *Contemporary mathematic*, 2001, **280**, pp. 193–219.
7. Alexandrov A.G. Method of frequency parameters. *Automatica and Telemekhanick*. 1988, **50**, no. 12, pp. 3–5 (in Russian).
8. Alexandrov A.G. Finite-frequency identification: multidimensional object. *International conference on control problem*. Proc. of the conf. Moscow: Institute of control problem RAS, 1999, no. 1, pp. 15–28 (in Russian).
9. Orlov Yu.F. Frequency parameters identification under parallel tests. *Automatica and Telemekhanick*, 2007, **68**, no. 1, pp. 20–40 (in Russian).
10. Gubarev V.F., Melnichuk S.V. Identification of multidimensional system using steady-state parameters. *Problems of Control and Informatic*, 2012, no. 5, pp. 26–43 (in Russian).

Получено 26.06.2014

ВНЕШНИЕ ЭЛЛИпсоИДАЛЬНЫЕ АППРОКСИМАЦИИ МНОЖЕСТВ ДОСТИЖИМОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Н.А. Бабий, В.В. Волосов, В.Н. Шевченко

Институт космических исследований НАН Украины и ГКА Украины

Рассмотрен класс дискретных и непрерывных динамических систем (ДС) с ограниченным возмущением. С использованием техники выпуклого анализа найдены уравнения эволюции эллипсоидов, содержащих множество достижимости ДС. Методом функций Ляпунова получена оценка предельного множества ДС. Для системы управления угловым движением твердого тела проведено сопоставление эллипсоидальных оценок предельного множества и асимптотики множества достижимости.

Ключевые слова: динамическая система, неопределенность, эллипсоидальные оценки, множество достижимости, предельное множество.

Розглянуто клас дискретних і неперервних динамічних систем (ДС) з обмеженим зовнішнім збуренням. З використанням техніки опуклого аналізу отримано рівняння еволюції еліпсоїдів, які містять множини досяжності ДС. Методом функцій Ляпунова отримано оцінку граничної множини ДС. Для системи керування кутовим рухом твердого тіла проведено співставлення еліпсоїдальних оцінок граничної множини й асимптотики множини досяжності.

Ключові слова: динамічна система, невизначеність, еліпсоїдальні оцінки, множина досяжності, гранична множина.

ВВЕДЕНИЕ

Под множеством достижимости (МД) динамической системы (ДС) в произвольный момент времени (непрерывного или дискретного) здесь понимается множество фазового пространства, в которое могут попасть в данный момент концы ее траекторий, «стартовых» из некоторого заданного начального множества при всех возможных значениях ограниченных внешних возмущений. Множества достижимости являются важной характеристикой динамических систем и используются при решении многих задач управления ими [1]. Однако они имеют достаточно сложную структуру даже для линейных систем. Поэтому используются их оценки множествами более простой структуры, а именно выпуклыми многогранниками и эллипсоидами. Важность проблемы разработки и усовершенствования алгоритмов построения оценок множеств достижимости для решения теоретических и прикладных задач, включая задачи управления аэрокосмическими и морскими объектами, подтверждается обширным и все пополняющимся списком публикаций (см., например, [2–6] и библиографию в них). В данной работе с помощью единого методологического подхода, основанного на формализованных методах выпуклого анализа, приводятся новые конструктивные алгоритмы эллипсоидального оценивания множеств достижимости линейных дискретных и непрерывных динамических систем.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим дискретную ДС вида

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + f_k, \quad k = 0, 1, \dots, \quad (1)$$

где вектор состояния $x_k \in R^n$, R^n — n -мерное евклидово пространство; u_k — заданный при всех $k \geq 0$ вектор управления $u_k \in R^m$, $m \leq n$; A_k и B_k заданные при всех k матрицы соответствующих размерностей, $\det A_k \neq 0$ и $f_k \in R^n$ — неконтролируемое ограниченное возмущение

$$f_k^T G f_k \leq q^2 \quad \forall k, \quad (2)$$

где G — положительно определенная симметричная $n \times n$ -матрица, $G = G^T > 0$ q — заданная константа.

Для формулирования постановки задачи введем в рассмотрение эллипсоид вида

$$E_k = E[\bar{x}_k, H_k] = \{x \in R^n : \sigma(\bar{x}_k, H_k) \leq 1\}, \quad (3)$$

где $\sigma(x, \bar{x}_k, H_k) = (x - \bar{x}_k)^T H_k^{-1} (x - \bar{x}_k)$, \bar{x}_k — центр эллипсоида, H_k — положительно определенная $n \times n$ -матрица $H_k = H_k^T > 0$.

Предполагается, что при некотором произвольном значении $k = k_*$ задан эллипсоид $E[\bar{x}_k, H_k]$, т.е. заданы его центр \bar{x}_k и матрица H_k . При этом задача эллипсоидального оценивания множеств достижимости ДС (1) представляет собой задачу построения эллипсоида $E[\bar{x}_{k+1}, H_{k+1}]$ вида (3), который при всех $k \geq k_*$ в силу (1) содержит образ $W(k+1)$ эллипсоида $E[\bar{x}_k, H_k]$ для любого возмущения f_k , которое удовлетворяет условию (2). Другими словами, нужно при каждом $k \geq k_*$ найти эллипсоид $E[\bar{x}_{k+1}, H_{k+1}]$, такой, что при всех $x_k \in E[\bar{x}_k, H_k]$ и при любом возмущении f_k , которое удовлетворяет ограничению (2), выполняется включение $x_{k+1} \in E[\bar{x}_{k+1}, H_{k+1}]$.

Аналогичным образом ставится задача определения эллипсоидальных оценок множеств достижимости для непрерывных систем

$$\frac{dx}{dt} = A(t)x + B(t)u(t) + f(t), \quad (4)$$

где x — вектор состояния $x \in R^n$; $u(t)$ — заданный в каждый момент времени t вектор управления $u(t) \in R^m$, $m \leq n$; $A(t)$ и $B(t)$ — заданные матрицы соответствующих размерностей; неконтролируемое возмущение $f(t)$ удовлетворяет условию

$$f^T(t)Gf(t) \leq q^2 \quad \forall t \geq 0. \quad (5)$$

Предполагается, что векторные и матричные функции $u(t)$, $A(t)$, $B(t)$ и $f(t)$ являются непрерывными (кусочно-непрерывными) функциями времени.

По аналогии со случаем дискретной системы введем в рассмотрение эллипсоид

$$E(t) = E[\hat{x}(t), \dots, H(t)] = \{x \in R^n : \sigma[\hat{x}(t), H(t)] \leq 1\}, \quad (6)$$

где $\sigma[\hat{x}(t), H(t)] = [x - \hat{x}(t)]^T H^{-1}(t)[x - \hat{x}(t)]$. Полагаем известным в некоторый момент времени $t = t_*$ (который без потери общности принимаем $t_* = 0$) априорный эллипсоид $E(t_*) = E[\hat{x}(t_*), H(t_*)]$. Тогда ставится задача построения эллипсоидов $E[\hat{x}(t), H(t)]$, таких, что $x(t) \in E(t)$ при всех $t > t_*$ и $x(t_*) \in E(t_*)$ и возмущениях $f(t)$, удовлетворяющих ограничению (5).

Целью данной работы является получение новых конструктивных алгоритмов эллипсоидального оценивания множеств достижимости линейных дискретных и непрерывных динамических систем с использованием единого методологического подхода, основанного на формализованных методах выпуклого анализа.

МНОЖЕСТВО ДОСТИЖИМОСТИ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ

Утверждение 1. Оценка сверху множества достижимости системы (1), (2) при $k > 0$ эллипсоидами $E[\hat{x}_k, H_k]$ вида (3) определяется разностными уравнениями

$$\hat{x}_{k+1} = A_k \hat{x}_k + B_k u_k, \quad (7)$$

$$H_{k+1} = (1 + p)A_k H_k A_k^T + p^{-1}(1 + p)q^2 G^{-1} \quad (8)$$

при любом значении параметра $p > 0$ и заданном начальном эллипсоиде $E[\hat{x}_0, H_0]$.

Доказательство. Для доказательства утверждения 1 воспользуемся аппаратом опорных функций выпуклых множеств [7]. Эллипсоид $E[\hat{x}_k, H_k]$, кроме соотношения (3), также может задаваться своей опорной функцией $\delta\{l|E[\hat{x}_k, H_k]\}$. При использовании опорной функции эллипсоид $E[\hat{x}_k, H_k]$ определяется соотношением

$$l^T x \leq \delta\{l|E[\hat{x}_k, H_k]\} \quad \forall l \in R^n, \quad (9)$$

где, согласно [1], опорная функция эллипсоида $E[\hat{x}_k, H_k]$ определяется соотношением $\delta\{l|E[\hat{x}_k, H_k]\} = \max_{x \in E_k} l^T x$ и имеет вид

$$\delta\{l|E[\hat{x}_k, H_k]\} = l^T \hat{x}_k + \sqrt{l^T H_k l}. \quad (10)$$

Для опорной функции $\delta\{l|W_{k+1}\}$ образа W_{k+1} эллипсоида $E[\hat{x}_k, H_k]$ при его отображении соотношением (1) имеем оценку сверху

$$\delta\{l|W_{k+1}\} = \max_{\substack{x \in E_K \\ f \in F_k}} l^T [A_k x + B_k u_k + f] \leq \max_{x \in E_K} l^T A_k x + l^T B_k u_k + \max_{f \in F_K} l^T f, \quad (11)$$

где $F_k = \{f : f^T \bar{H}^{-1} f - 1 \leq 0, \bar{H} = q^2 G^{-1}\}$. Функция Лагранжа, соответствующая задаче отыскания максимума первого слагаемого в неравенстве (11), имеет вид

$$L(x, \lambda) = l^T A_k x - 0,5\lambda[\sigma(x, \hat{x}_k, H_k) - 1], \quad (12)$$

где $\lambda \geq 0$ [8]. Согласно теореме двойственности решения задач математического программирования [8] имеем

$$\max_{x \in E_K} l^T A_k x = \min_{\lambda} \varphi(\lambda), \quad (13)$$

где функция максимума $\varphi(\lambda)$ — выпуклая функция $\varphi(\lambda) = \max_{x \in R^n} L(x, \lambda)$ [8].

Другими словами, $\max_{x \in E_K} l^T A_k x = \min_{\lambda} \max_{x \in R^n} L(x, \lambda)$ при $\lambda \geq 0$. При этом из

(11) следует, что

$$\delta\{l|W_{k+1}\} \leq \varphi(\lambda) + l^T B_k u_k + \sqrt{l^T \bar{H} l}, \quad \bar{H} = q^2 G^{-1} \quad \forall \lambda \geq 0. \quad (14)$$

Найдем явный вид функции максимума $\varphi(\lambda)$. Приравнявая производную по x функции $L(x, \lambda)$ нулю, получим выражение $x_e = \hat{x}_k + \lambda^{-1} H_k A_k^T l$, в результате подстановки которого в (12) при $\lambda = \sqrt{l^T A_k H_k A_k^T l}$ из (14) находим

$$\delta\{l|W_{k+1}\} \leq l^T \tilde{x}_{k+1} + \sqrt{l^T \tilde{H}_{k+1} l} + \sqrt{l^T \bar{H} l}, \quad (15)$$

где $\tilde{x}_{k+1} = A_k \hat{x}_k + B_k u_k$, $\tilde{H}_{k+1} = A_k H_k A_k^T$. Из свойств опорных функций [1, 9] и формулы (10) вытекает, что правая часть (15) есть опорная функция множества, которое является суммой Минковского [9] двух эллипсоидов вида (3) $E[\tilde{x}_{k+1}, \tilde{H}_{k+1}]$ и $E[0, \bar{H}]$. Однако множество-сумма Минковского двух эллипсоидов не является эллипсоидом. Согласно [10], указанное множество содержится в эллипсоиде $E[\hat{x}_{k+1}, H_{k+1}]$, центр и матрица которого определяются уравнениями (7), (8). Утверждение 1 доказано.

Функция $SpH_{k+1}(p)$, определяемая формулой (8), является выпуклой и достигает минимума при $p_e = \sqrt{(SpA_k H_k A_k^T)^{-1} SpG^{-1}}$. Подставив значение p_e в формулу (8), получаем следующее утверждение.

Утверждение 2. Оценка сверху множества достижимости ДС (1), (2) при $k > 0$ эллипсоидами $E[\hat{x}_k, H_k]$ вида (3) с локально оптимальными матрицами H_k определяется решениями разностных уравнений

$$\hat{x}_{k+1} = A_k \hat{x}_k + B_k u_k, \quad (16)$$

$$H_{k+1} = \left[1 + q \sqrt{\frac{SpG^{-1}}{SpA_k H_k A_k^T}} \right] A_k H_k A_k^T + q \left[q + \sqrt{\frac{SpA_k H_k A_k^T}{SpG^{-1}}} \right] G^{-1} \quad (17)$$

при заданном начальном эллипсоиде $E[\hat{x}_0, H_0]$.

МНОЖЕСТВО ДОСТИЖИМОСТИ НЕПРЕРЫВНЫХ СИСТЕМ

Утверждение 3. Для оценки сверху множества достижимости ДС (4, 5) эллипсоидами $E[\hat{x}(t), H(t)]$ вида (6) с локально минимальным следом матрицы $H(t)$ необходимо решить задачу Коши для дифференциальных уравнений

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = A(t)\hat{x} + B(t)u(t), \quad (18)$$

$$\frac{dH}{dt} = A(t)H + HA^T(t) + q \left[\sqrt{\frac{SpG^{-1}}{SpH}} H + \sqrt{\frac{SpH}{SpG^{-1}}} G^{-1} \right] \quad (19)$$

при заданном начальном эллипсоиде $E[\hat{x}(t_0), H(t_0)]$. При гурвицевой матрице $A(t) \equiv A$ и $u(t) \equiv 0$ эллипсоид $E[0, H_\infty]$ определяет гарантированную оценку установившейся точности системы.

Доказательство. Согласно явной схеме Эйлера численного интегрирования дифференциальных уравнений [11], для достаточно малых $\tau > 0$ имеем

$$x(t + \tau) = \tilde{A}(t, \tau)x(t) + \tau B(t)u(t) + \tau[f(t) + f_0(t, \tau)], \quad (20)$$

где $\tilde{A}(t, \tau) = I_n + \tau A(t)$, $\|f_0(t, \tau)\| \leq \mu(\tau)$, $\mu(\tau) \rightarrow 0$ при $\tau \rightarrow 0$. Для объединения по всем $x(t) \in E[\hat{x}(t), H(t)]$ и $f^T(t)Gf(t) \leq q^2 \forall t \geq 0$ формула (20) определяет образ $\tilde{W}(t + \tau)$ эллипсоида $E[\hat{x}(t), H(t)]$. Найдем оценку сверху для выпуклой оболочки $W(t + \tau)$ этого образа. По определению опорной функции [7] $\delta[l|W(t + \tau)]$ выпуклого множества имеем

$$\delta[l|W(t + \tau)] \leq S_1(x, t, \tau) + S_2(x, t, \tau), \quad (21)$$

где $S_1(x, t, \tau) = \max_{x \in E(t)} l^T \tilde{A}x + \tau l^T B(t)u(t)$, $S_2(x, t, \tau) = \tau \max_{f \in \tilde{E}(t)} l^T f + \tau \max_{\|f_0\| \leq \mu(\tau)} l^T f_0$,

$\tilde{E}(t) = E[0, \tilde{G}] = \{x : f^T \tilde{G}^{-1} f \leq 1\}$, $\tilde{G} = q^2 G^{-1}$. Воспользовавшись методом

неопределенных множителей Лагранжа и формулой [1, 12] для опорной функции эллипсоида вида (6), находим

$$S_1(x, t, \tau) \leq \delta\{l \mid E[\tilde{x}_1(t + \tau), \tilde{H}_1(t + \tau)]\}, \quad (22)$$

где

$$\delta\{l \mid E[\tilde{x}_1(t + \tau), \tilde{H}_1(t + \tau)]\} = l^T \tilde{x}_1(t + \tau) + \sqrt{l^T \tilde{H}_1(t + \tau) l}, \quad (23)$$

$$\tilde{x}_1(t + \tau) = \tilde{A}(t, \tau)\hat{x}(t) + \tau B(t)u(t), \quad \tilde{H}_1(t + \tau) = \tilde{A}(t, \tau)H(t)\tilde{A}^T(t, \tau).$$

Для оценки $S_2(x, t, \tau)$ аналогичным образом получаем

$$S_2(x, t, \tau) \leq \delta\{l \mid E[\tilde{x}_2(t + \tau), \tilde{H}_2(t + \tau)]\}, \tilde{x}_2(t + \tau) = 0, \quad (24)$$

$$\text{где} \quad \delta\{l \mid E[0, \tilde{H}_2(t + \tau)]\} = \sqrt{l^T \tilde{H}_2(t + \tau) l}, \quad \tilde{H}_2(t + \tau) = \tau^2 \alpha^2(\tau) q^2 G^{-1},$$

$$\alpha(\tau) = 1 + \mu(\tau)(e^T \tilde{G}^{-1} e)^{-9,5} \quad \forall e \in R^n, \|e\| = 1, \quad \alpha(\tau) \rightarrow 1 \text{ при } \tau \rightarrow 0.$$

Из соотношения (21) с учетом (20)–(24) получаем

$$\delta\{l \mid W(t + \tau)\} \leq \delta\{l \mid E[\tilde{x}_1(t + \tau), \tilde{H}_1(t + \tau)]\} + \delta\{l \mid E[0, \tilde{H}_2(t + \tau)]\}. \quad (25)$$

В правой части неравенства (25) имеется сумма опорных функций двух множеств-эллипсоидов вида (6). Как известно [9], сумме опорных функций двух множеств соответствует сумма Минковского этих множеств, в данном случае эллипсоидов. Напомним, что сумма Минковского двух множеств-эллипсоидов не является эллипсоидом. Она содержится в p -параметрическом семействе эллипсоидов $E[\hat{x}(t + \tau), H(t + \tau)]$ [10], где

$$\left. \begin{aligned} \hat{x}(t + \tau) &= \tilde{x}_1(t + \tau), \\ H(t + \tau) &= (1 + p)\tilde{H}_1(t + \tau) + p^{-1}(1 + p)\tilde{H}_2(t + \tau) \quad \forall p > 0 \end{aligned} \right\}. \quad (26)$$

Полагая в (26) $p = \gamma\tau, \gamma > 0$ и подставляя приведенные выше значения $\tilde{x}_1(t + \tau), \tilde{H}_1(t + \tau)$, получаем

$$\left. \begin{aligned} \hat{x}(t + \tau) &= \hat{x}(t) + \tau[A(t)\hat{x} + B(t)u(t)] + \tau\psi(\gamma, \tau), \\ H(t + \tau) &= H(t) + \tau[A(t)H + HA^T(t)] + \tau\gamma H + \frac{\tau}{\gamma} q^2 G^{-1} + \tau\Psi(\gamma, \tau) \quad \forall \gamma > 0 \end{aligned} \right\}, \quad (27)$$

где $\|\psi(\gamma, \tau)\| \rightarrow 0, \|\Psi(\gamma, \tau)\| \rightarrow 0$ при $\tau \rightarrow 0$. Функция следа матрицы $H(t + \tau)$, определяемая правой частью формулы в (27) с учетом слагаемых первого порядка малости относительно τ (линейных по τ), $\varphi(\gamma) = SpH(t + \tau)$

является выпуклой и имеет минимум при $\gamma = \gamma_* = q \sqrt{\frac{SpG^{-1}}{SpH}}$. Составляя

согласно формулам (27) при $\gamma = \gamma_*$ разности $\tau^{-1}[\hat{x}(t + \tau) - \hat{x}(t)]$, $\tau^{-1}[H(t + \tau) - H(t)]$ и переходя к пределу при $\tau \rightarrow 0$, получаем формулы (18), (19). Утверждение 3 доказано.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЕЙ ТВЕРДОГО ТЕЛА ПРИ ДЕЙСТВИИ ОГРАНИЧЕННОГО ВНЕШНЕГО ВОЗМУЩЕНИЯ

Исследуем эффективность алгоритмов оценивания множеств достижимости ДС на примере задачи оценивания точности управления ориентацией твердого тела. Проведем сопоставление полученного решения с решением, получаемым с использованием аппарата функций Ляпунова. Под оценкой точности в первом случае понимается эллипсоид, определяемый установившимся значением матрицы $H(t)$ при достаточно больших значениях времени в уравнениях (18), (19) при гурвицевой матрице $A(t) \equiv A$ и $u(t) \equiv 0$. Во втором случае оценка точности определяется оценкой предельного множества системы. Напомним, что под предельным множеством ДС понимается множество в ее фазовом пространстве, в которое попадают (или к которому неограниченно приближаются) все ее фазовые траектории (диссипативность в целом) или стартующие из определенной области (диссипативность в области) [13, 14]. Воспользуемся математической моделью управляемого углового движения космического аппарата (КА), рассматриваемого как твердое тело [15], с дополнительным учетом ограниченного внешнего возмущения. Для простоты рассмотрим случай управления ориентацией относительно инерциальной системы координат. Целью управления ориентацией является совмещение связанной с КА системы координат (СК) с выбранной инерциальной. При этом уравнения углового движения из [15] имеют вид

$$\dot{\Phi} = A(\Phi)\omega, \quad J\dot{\omega} = M - \Omega(\omega)J\omega, \quad (28)$$

где $\Phi^T = (\gamma, \psi, \theta)$ — вектор углов Крылова (крен, рыскание, тангаж), определяющий положение связанной СК относительно инерциальной СК; $\omega^T = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)$ — вектор проекций угловой скорости КА на оси связанной СК; $J = \text{diag}\{J_1, J_2, J_3\}$ — матрица представления тензора инерции КА в связанной СК; $M = u + f(t)$, где $u^T = (u_1, u_2, u_3)$ — вектор моментов управления, заданный в связанной СК, $u = -\alpha\Phi - K\omega$, $K = \text{diag}\{k_1, k_2, k_3\}$, $\alpha > 0$, $k_i > 0$ — коэффициенты усиления в законе управления; $f^T(t) = (f(t)_1, f(t)_2, f(t)_3)$ — вектор неконтролируемых внешних возмущений, ограниченных заданной константой $f^T(t)Gf(t) \leq q^2 \quad \forall t \geq 0$. Матрицы $A(\Phi)$ и $\Omega(\omega)$ имеют вид

$$A(\Phi) = \begin{pmatrix} \cos \psi & 0 & \sin \psi \\ \sin \psi \operatorname{tg} \gamma & 1 & -\cos \psi \operatorname{tg} \gamma \\ -\frac{\sin \psi}{\cos \gamma} & 0 & \frac{\cos \psi}{\cos \gamma} \end{pmatrix}, \quad \Omega(\omega) = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_3 & \omega_2 \\ \omega_3 & 0 & -\omega_1 \\ -\omega_2 & \omega_1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Управление $u = -\alpha\Phi - K\omega$ при отсутствии возмущения $F(t) \equiv 0$, $t \rightarrow \infty$ приводит ДС (28) в начало координат $\Phi = 0$, $\omega = 0$. При действии достаточно малого возмущения вектор фазового состояния системы будет находиться в области вблизи начала координат. Поэтому для нахождения множества достижимости будем рассматривать линеаризованную систему в окрестности начала координат. После линеаризации все три канала (крен, рыскание и тангаж) становятся независимыми. Для определенности рассмотрим канал тангажа. При этом получим систему $\dot{\theta} = \omega_3$, $J_3 \dot{\omega}_3 = u_3 + f_3(t)$, $u_3 = -\tilde{\alpha}\theta - \tilde{k}_3\omega_3$, векторно-матричная запись которой имеет вид ДС (4), (5):

$$\dot{x} = Ax + f(t), \quad f^T(t)Gf(t) \leq q^2, \quad (29)$$

где

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\alpha & -k_3 \end{pmatrix}, \quad x = \begin{pmatrix} \theta \\ \omega_3 \end{pmatrix}, \quad f(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ f_3(t) \end{pmatrix}, \quad \alpha = J_3^{-1}\tilde{\alpha}, \quad k_3 = J_3^{-1}\tilde{k}_3.$$

Для построения множества достижимости системы (29) может быть использовано утверждение 3. При выполнении компьютерного моделирования динамики эволюции множества достижимости системы (29) были выбраны следующие значения ее параметров и начальных условий: $\alpha = 2$, $k_3 = 2$, $q = 0,1$, $G = I_2$, $\hat{x}(0) = (5,2)^T$, $H(0) = I_2$. «Неконтролируемое» возмущение полагалось равным $f_3 = q \sin(\lambda t)$, частота λ которого соответствовала резонансной частоте системы. При этом неизвестный истинный вектор начального состояния полагался равным $x^*(0) = (4,5; 2,5)^T$.

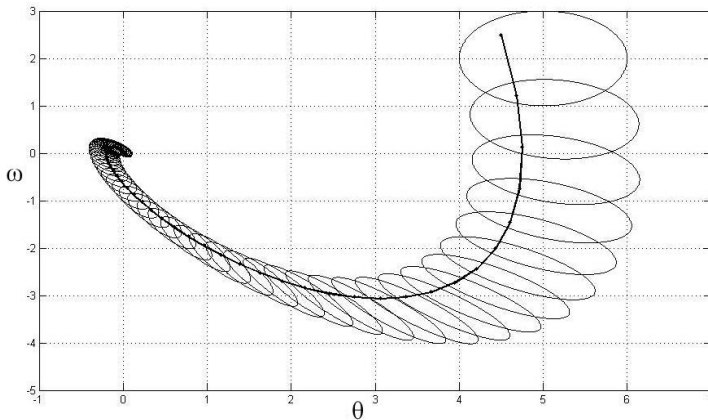


Рис. 1. Изменение аппроксимирующих эллипсоидов во времени

На рис. 1 изображена дискретная аппроксимация интегральной воронки [6] системы (29). Она представляет собой последовательность эллипсоидальных оценок множеств достижимости, построенных через промежуток времени 0,1 с. Каждому эллипсоиду принадлежит истинный вектор состояния $x^*(t)$ системы в соответствующий момент времени.

Истинная фазовая траектория системы изображена на рисунке жирной линией.

На рис. 2, 3 приведены графики изменения следа и определителя матриц H во времени. Видно, что в асимптотике значения следа и определителя сходятся к определенным константам, а эллипсоид — оценка множества достижимости системы в асимптотике приходит к некоторому установившемуся значению, определяющему гарантированную оценку точности стабилизации системы.

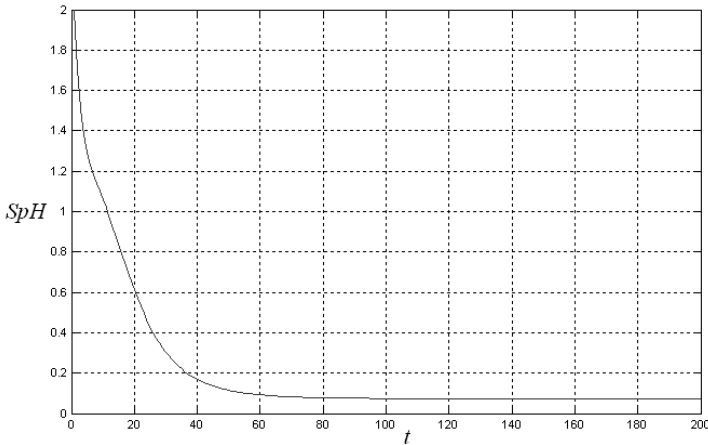


Рис. 2. Изменение следа матриц H во времени

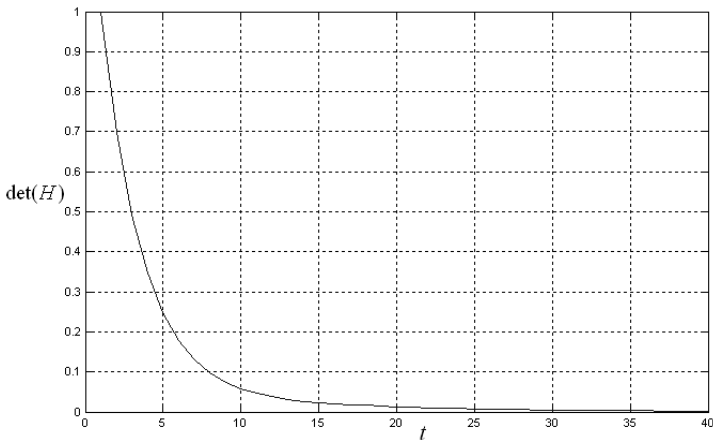


Рис. 3. Изменение определителя матриц H во времени

Получим теперь оценку предельного множества системы (29), которое по определению [13, 14], также является и оценкой точности системы в установившемся режиме. Воспользуемся для этого известными обобщениями [13, 14] прямого метода Ляпунова на исследование устойчивости множеств и выберем функцию Ляпунова в виде квадратичной формы $v(x) = x^T P x$, $P = P^T > 0$. Производная функции Ляпунова, вычисленная согласно уравнению (29), имеет вид

$$\dot{v}(x) = x^T (A^T P + P A)x + 2f^T P x. \quad (30)$$

Так как матрица A является Гурвицева, то матричное уравнение Ляпунова $A^T P + PA = -C$ имеет решение $P > 0$ при любой матрице $C = C^T > 0$. Полагая для определенности матрицу $C = I_2$, находим решение уравнения Ляпунова:

$$P = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \alpha^{-1} k_3 + k_3^{-1} (1 + \alpha) & \alpha^{-1} \\ \alpha^{-1} & \alpha^{-1} k_3^{-1} (1 + \alpha) \end{pmatrix}.$$

Найдем множество фазового пространства системы (29), на котором $\dot{v}(x) \leq 0$. Воспользовавшись соотношением (30) и полагая для простоты матрицу $G = I_2$, находим оценку

$$\dot{v}(x) \leq -\|x\|^2 + 2\|f\| \cdot \|Px\| \leq -\|x\|^2 + 2q\lambda_{\max}(P)\|x\| \leq 0, \quad (31)$$

где $\lambda_{\max}(P)$ — максимальное собственное значение матрицы P . Из цепочки неравенств (31) получаем, что $\dot{v}(x) \leq 0$ на множестве $\|x\| \geq \rho$, $\rho = 2q\lambda_{\max}(P)$. Согласно [13, 14], предельным множеством системы (29) будет множество, ограниченное поверхностью уровня функции Ляпунова $v(x) \leq \mu^2$, где $\mu^2 = \max_{\|x\|=\rho} v(x)$. Воспользовавшись оценками значений квадратичных форм на

шаре единичного радиуса [16], получаем $\mu^2 = 4q^2\lambda_{\max}^3(P)$. Таким образом, оценка сверху предельного множества системы определяется множеством

$$M = \left\{ x : x^T P x \leq \mu^2, \mu^2 = 4q^2\lambda_{\max}^3(P) \right\}. \quad (32)$$

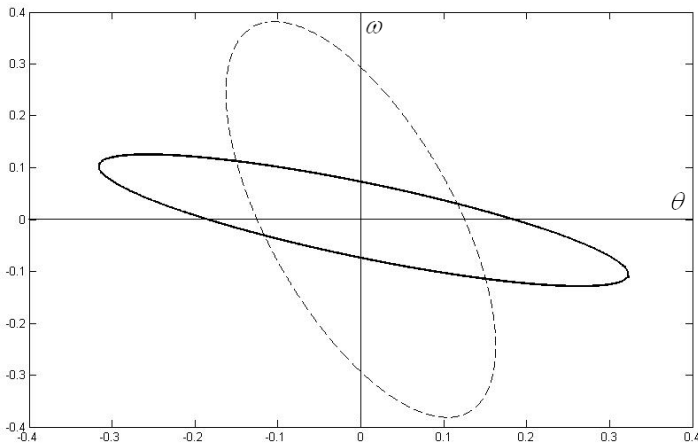


Рис.4 Оценка предельного множества системы и асимптотики оценки ее множества достижимости

На рис. 4 приведены эллипсоидальная оценка асимптотики множества достижимости системы и оценка ее предельного множества, изображенные соответственно жирной и штриховой линиями. Проектируя полученные эллипсоиды на оси координат согласно [17] можно получить представляющие наибольший интерес гарантированные интервальные

оценки точности управления по каждой из координат (по углу и угловой скорости) отдельно. Из рисунка непосредственно видно, что пересечения интервальных оценок существенно меньше каждой из них. Поэтому для оценки точности установившейся системы целесообразно использовать не только эллипсоидальные оценки предельного множества, но и оценки множества достижимости системы.

Выводы

Метод эллипсоидальной аппроксимации множеств достижимости непрерывных и дискретных динамических систем, подверженных действию неконтролируемых ограниченных внешних возмущений, основан на использовании формализованных методов выпуклого анализа, а именно на теории опорных функций выпуклых множеств.

Эффективность оценки точности стабилизации системы по асимптотике ее множеств достижимости иллюстрируется на примере системы управления ориентацией КА. Для получения оценки предельного множества системы управления ориентацией КА используются известные обобщения прямого метода Ляпунова на исследование устойчивости инвариантных множеств динамических систем. Полученные оценки сопоставляются с асимптотикой множества достижимости системы.

Гарантированные интервальные оценки точности ориентации, полученные при совместном использовании оценок множеств достижимости и оценок предельных множеств, существенно лучше по сравнению с оценками, полученными при использовании каждого из них в отдельности.

1. Черноусько Ф.Л. Оценка фазового состояния динамических систем. Метод эллипсоидов / Ф.Л. Черноусько. — М. : Наука, 1988. — 320 с.
2. Кунцевич В.М. Области достижимости линейных и некоторых классов нелинейных дискретных систем и управления ими / В.М. Кунцевич, А.Б. Куржанский // Проблемы управления и информатики. — 2010. — № 1. — С. 5–20.
3. Кунцевич В.М. Инвариантные множества (области диссипативности) нелинейных дискретных систем в задачах анализа и синтеза систем управления / В.М. Кунцевич // Пленарные доклады Межд. мультikonференции «Теория и системы управления». Москва, 26-30 января 2009 г. — М. : Институт управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2009. — С. 206–217.
4. Овсеевич А.И. Свойства оптимальных эллипсоидов, приближающих области достижимости систем с неопределенностями / А.И. Овсеевич, Ф.Л. Черноусько // Изв. РАН «Теория и системы управления». — 2004. — № 4. — С. 8–18.
5. Гусев М.И. Оценка множеств достижимости многомерных управляемых систем с нелинейными перекрестными связями / М.И. Гусев // Труды ИММ УрО РАН, 2009. — 16, — № 1. — С. 223–232.
6. Ушаков В.Н. Аппроксимация множеств достижимости и интегральных воронок дифференциальных включений / В.Н. Ушаков, А.Р. Матвийчук, А.В. Ушаков // Вестн. Удмуртского ун-та. — 2011. — Вып. 4. — С. 23–39.
7. Рокафеллар Р. Выпуклый анализ / Р. Рокафеллар. — М. : Мир, 1973. — 470 с.
8. Пшеничный Б.Н. Численные методы в экстремальных задачах / Б.Н. Пшеничный, Ю.М. Данилин. — М. : Наука, 1975. — 320 с.
9. Половинкин Е.С. Элементы выпуклого и сильно выпуклого анализа / Е.С. Половинкин, М.В. Балашов. — М. : Физматлит, 2004. — 416 с.

10. Scheweppe F.C. Recursive state estimation: unknown but bounded error and system inputs// IEEE Trans. Automat Control. 1968. — Vol. AC-13, No 1. — P. 22–28.
11. Бахвалов Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. — М. : Наука, 1987. — 600 с.
12. Куржанский А.Б. Управление и наблюдение в условиях неопределенности / А.Б. Куржанский. — М. : Наука, 1977. — 392 с.
13. Зубов В.И. Устойчивость движения / В.И. Зубов. — М. : Высшая школа, 1973. — 272с.
14. Кунцевич В.М. Синтез систем автоматического управления с помощью функций Ляпунова / В.М. Кунцевич, М.М. Лычак. — М. : Наука, 1978. — 400 с.
15. Волосов В.В. Об управлении ориентацией космического аппарата в орбитальной системе координат с использованием эллипсоидальных оценок его вектора состояния / В.В. Волосов // Проблемы управления и информатики. — 1998. — № 5. — С. 31–41.
16. Воеводин В.В. Матрицы и вычисления / В.В. Воеводин, Ю.А. Кузнецов. — М. : Наука, 1984. — 320 с.
17. Волосов В.В. Исследование алгоритма одновременного оценивания фазового состояния и параметров дискретного динамического объекта / В.В. Волосов, А.С. Калита // Кибернетика и вычисл. техника. — 1988. — Вып. 79. — С. 23–28.

Получено 23.06.2014

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КОЛЕБАНИЯМИ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ МЕМБРАНЫ

Копец М.М.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

Рассмотрена линейно-квадратическая задача оптимального управления процессом колебаний прямоугольной мембраны. С помощью метода множителей Лагранжа получены необходимые условия оптимальности. На их основе выведена система интегро-дифференциальных уравнений Риккати с частными производными. Решение последней системы дало возможность выписать явную формулу для вычисления оптимального управления.

Ключевые слова: оптимальное управление, метод множителей Лагранжа, необходимые условия оптимальности уравнения Риккати.

Розглянуто лінійно-квадратичну задачу оптимального управління процесом коливань прямокутної мембрани. За допомогою методу множників Лагранжа отримані необхідні умови оптимальності. На їх основі виведена система інтегро-диференціальних рівнянь Ріккати з приватними похідними. Рішення останньої системи дало можливість виписати явну формулу для обчислення оптимального керування.

Ключові слова: оптимальне керування, метод множників Лагранжа, необхідні умови оптимальності рівняння Ріккати.

ВВЕДЕНИЕ

В теории оптимального управления одно из центральных мест справедливо занимает линейно-квадратическая задача. Для управляемых систем со сосредоточенными параметрами эта задача исследована достаточно подробно [1, 2], чего нельзя утверждать об аналогичной задаче для систем с распределенными параметрами. В некоторых достаточно известных монографиях она вовсе не рассматривается [3, 4]. В других работах для ее исследования использованы методы функционального анализа [5], что обуславливает достаточно высокий уровень абстракции. В противовес этому подходу в данной статье для исследования линейно-квадратической задачи предлагаются современные методы вариационного исчисления и математической физики.

Цель настоящей статьи состоит в исследовании линейно-квадратичной задачи оптимального управления процессом колебаний прямоугольной мембраны, а именно: получение необходимых условий оптимальности и вывод формулы для вычисления оптимального управления.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть управляемый процесс описывается следующим линейным дифференциальным уравнением с частными производными

$$\frac{\partial^2 z(t, x, y)}{\partial t^2} = a^2 \left(\frac{\partial^2 z(t, x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z(t, x, y)}{\partial y^2} \right) + u(t, x, y), \quad (1)$$

где $0 \leq x \leq l$, $0 \leq y \leq m$, $t_0 \leq t \leq t_1$, действительные числа $a > 0$, $l > 0$, $m > 0$, $t_0 \geq 0$, $t_1 > t_0$ известны. Если через Ω обозначить множество $\Omega = \{(t, x, y) : t \in [0, l], x \in [0, l], y \in [0, m]\}$, то функция $u(t, x, y) \in L_2(\Omega)$ называется допустимым управлением. Для фиксированного допустимого управления $u(t, x, y)$ под решением $z(t, x, y)$ уравнения (1) подразумеваем обобщенное решение $z(t, x, y) \in W_2^{1,0}(\Omega)$. Для уравнения (1) заданы начальные условия

$$z(t_0, x, y) = f(x, y), \quad \frac{\partial z(t_0, x, y)}{\partial t} = g(x, y), \quad (2)$$

где функции $f(x, y) \in L_2(\Sigma)$, $g(x, y) \in L_2(\Sigma)$ предполагаются известными (множество Σ имеет вид $\Sigma = \{(x, y) : x \in [0, l], y \in [0, m]\}$), символ $\frac{\partial z(t_0, x, y)}{\partial t}$ обозначает значение частной производной $\frac{\partial z(t, x, y)}{\partial t}$ при $t = t_0$. Подобным образом трактуются символ $\frac{\partial z(t_1, x, y)}{\partial t}$. Краевые условия для уравнения (1) являются однородными, т.е.

$$z(t, 0, y) = 0, \quad z(t, l, y) = 0, \quad z(t, x, 0) = 0, \quad z(t, x, m) = 0. \quad (3)$$

На решениях задачи (1)–(3) рассматривается функционал

$$I(u, z) = \frac{1}{2} \int_0^l \int_0^m z^2(t_1, x, y) dy dx + \frac{1}{2} \int_0^l \int_0^m \left[\frac{\partial z(t_1, x, y)}{\partial t} \right]^2 dy dx + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} \int_0^l \int_0^m [z^2(t, x, y) + u^2(t, x, y)] dy dx dt. \quad (4)$$

Задача оптимального управления (1)–(4) состоит в определении допустимого управления $u(t, x, y)$ и соответствующего ему решения $z(t, x, y)$ задачи (1)–(3), на которых функционал (4) принимает наименьшее возможное значение.

НЕОБХОДИМЫЕ УСЛОВИЯ ОПТИМАЛЬНОСТИ

Одним из возможных методов для нахождения решения сформулированной выше задачи оптимального управления (1)–(4) является метод множителей Лагранжа [6, с. 31]. Сущность этого метода состоит в замене функционала (4) следующим вспомогательным функционалом

© М.М. Копец, 2014

ISSN 0452-9910. Кибернетика и вычисл. техника. 2014. Вып. 177

$$\begin{aligned}
J(p, u, z) = & \frac{1}{2} \int_0^l \int_0^m z^2(t_1, x, y) dy dx + \frac{1}{2} \int_0^l \int_0^m \left[\frac{\partial z(t_1, x, y)}{\partial t} \right]^2 dy dx + \\
& + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} \int_0^l \int_0^m [z^2(t, x, y) + u^2(t, x, y)] dy dx dt + \\
& + \int_{t_0}^{t_1} \int_0^l \int_0^m p(t, x, y) \left[a^2 \left(\frac{\partial^2 z(t, x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z(t, x, y)}{\partial y^2} \right) + \right. \\
& \left. + u(t, x, y) - \frac{\partial^2 z(t, x, y)}{\partial t^2} \right] dy dx dt,
\end{aligned} \tag{5}$$

где $p(t, x, y)$ — неизвестная функция (множитель Лагранжа). В результате такой замены задача на условный экстремум (1)–(4) сводится к задаче минимизации функционала (5) с учетом условий (2) и (3). Далее находим выражение ΔJ для приращения функционала (5)

$$\Delta J = J(p + \varepsilon \delta p, u + \varepsilon \delta u, z + \varepsilon \delta z) - J(p, u, z).$$

Используя соотношение (5), выражение для ΔJ можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned}
\Delta J = & \frac{1}{2} \int_0^l \int_0^m [z(t_1, x, y) + \varepsilon \delta z(t_1, x, y)]^2 dy dx + \\
& + \frac{1}{2} \int_0^l \int_0^m \left[\frac{\partial z(t_1, x, y)}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial \delta z(t_1, x, y)}{\partial t} \right]^2 dy dx + \\
& + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} \int_0^l \int_0^m \left[[z(t, x, y) + \varepsilon \delta z(t, x, y)]^2 + [u(t, x, y) + \varepsilon \delta u(t, x, y)]^2 \right] dy dx dt + \\
& + \int_{t_0}^{t_1} \int_0^l \int_0^m [p(t, x, y) + \varepsilon \delta p(t, x, y)] \left[a^2 \left(\frac{\partial^2 z(t, x, y)}{\partial x^2} + \varepsilon \frac{\partial^2 \delta z(t, x, y)}{\partial x^2} \right) + \right. \\
& \left. + \left(\frac{\partial^2 z(t, x, y)}{\partial y^2} + \varepsilon \frac{\partial^2 \delta z(t, x, y)}{\partial y^2} \right) \right] + u(t, x, y) + \varepsilon \delta u(t, x, y) -
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{\partial^2 z(t, x, y)}{\partial y^2} - \varepsilon \frac{\partial^2 \delta z(t, x, y)}{\partial y^2} \Big] dy dx dt - \frac{1}{2} \int_0^l \int_0^m z^2(t_1, x, y) dy dx - \\
& - \frac{1}{2} \int_0^l \int_0^m \left[\frac{\partial z(t_1, x, y)}{\partial t} \right]^2 dy dx - \frac{1}{2} \int_0^{t_1} \int_0^l \int_0^m [z^2(t, x, y) + u^2(t, x, y)] dy dx dt - \\
& + \int_0^{t_1} \int_0^l \int_0^m p(t, x, y) \left[a^2 \left(\frac{\partial^2 z(t, x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z(t, x, y)}{\partial y^2} \right) + \right. \\
& \left. + u(t, x, y) - \frac{\partial^2 z(t, x, y)}{\partial t^2} \right] dy dx dt. \tag{6}
\end{aligned}$$

Выполнив очевидные преобразования, вместо соотношения (6) получим такое равенство:

$$\begin{aligned}
\Delta J = & \varepsilon \int_0^l \int_0^m [z(t_1, x, y) \delta z(t_1, x, y)] dy dx + \varepsilon \int_0^l \int_0^m \frac{\partial z(t_1, x, y)}{\partial t} \frac{\partial \delta z(t_1, x, y)}{\partial t} dy dx + \\
& + \varepsilon \int_0^{t_1} \int_0^l \int_0^m [z(t, x, y) \delta z(t, x, y) + u(t, x, y) \delta u(t, x, y)] dy dx dt + \\
& + \varepsilon \int_0^{t_1} \int_0^l \int_0^m p(t, x, y) \left[a^2 \left(\frac{\partial^2 \delta z(t, x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \delta z(t, x, y)}{\partial y^2} \right) + \right. \\
& \left. + \delta u(t, x, y) - \frac{\partial^2 \delta z(t, x, y)}{\partial t^2} \right] dy dx dt + \\
& + \int_0^{t_1} \int_0^l \int_0^m \delta p(t, x, y) \left[a^2 \left(\frac{\partial^2 z(t, x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z(t, x, y)}{\partial y^2} \right) + \right. \\
& \left. + u(t, x, y) - \frac{\partial^2 z(t, x, y)}{\partial t^2} \right] dy dx dt + \\
& + \frac{\varepsilon^2}{2} \int_0^l \int_0^m [\delta z(t_1, x, y)]^2 dy dx + \frac{\varepsilon^2}{2} \int_0^l \int_0^m \left[\frac{\partial \delta z(t_1, x, y)}{\partial t} \right]^2 dy dx +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\varepsilon^2}{2} \int_{t_0}^{t_1} \int_0^l \int_0^m [\delta z(t, x, y)]^2 + [\delta u(t, x, y)]^2 dy dx dt + \\
& + \varepsilon^2 \int_{t_0}^{t_1} \int_0^l \int_0^m \delta p(t, x, y) \left[a^2 \left(\frac{\partial^2 \delta z(t, x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \delta z(t, x, y)}{\partial y^2} \right) + \right. \\
& \left. + \delta u(t, x, y) - \frac{\partial^2 \delta z(t, x, y)}{\partial t^2} \right] dy dx dt.
\end{aligned} \tag{7}$$

Поскольку должно выполняться соотношение

$$\begin{aligned}
& a^2 \left(\frac{\partial^2 z(t, x, y)}{\partial x^2} + \varepsilon \frac{\partial^2 \delta z(t, x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z(t, x, y)}{\partial y^2} + \varepsilon \frac{\partial^2 \delta z(t, x, y)}{\partial y^2} \right) + \\
& + u(t, x, y) + \varepsilon \delta u(t, x, y) - \frac{\partial^2 z(t, x, y)}{\partial t^2} - \varepsilon \frac{\partial^2 \delta z(t, x, y)}{\partial t^2} = 0,
\end{aligned}$$

то принимая во внимание уравнение (1), получим такое равенство:

$$a^2 \left(\frac{\partial^2 \delta z(t, x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \delta z(t, x, y)}{\partial y^2} \right) + \delta u(t, x, y) - \frac{\partial^2 \delta z(t, x, y)}{\partial t^2} = 0. \tag{8}$$

Учитывая очевидные соотношения $\delta z(t_0, x, y) = f(x, y) - f(x, y) = 0$, $\frac{\partial \delta z(t_0, x, y)}{\partial t} = g(x, y) - g(x, y) = 0$ и дважды используя формулу интегрирования по частям, получим следующее равенство:

$$\begin{aligned}
& \int_{t_0}^{t_1} \int_0^l \int_0^m p(t, x, y) \frac{\partial^2 \delta z(t, x, y)}{\partial t^2} dy dx dt = \int_0^l \int_0^m p(t_1, x, y) \frac{\partial \delta z(t_1, x, y)}{\partial t} dy dx - \\
& - \int_0^l \int_0^m p(t_0, x, y) \frac{\partial \delta z(t_0, x, y)}{\partial t} dy dx - \int_{t_0}^{t_1} \int_0^l \int_0^m \frac{\partial p(t, x, y)}{\partial t} \frac{\partial \delta z(t, x, y)}{\partial t} dy dx dt = \\
& = \int_0^l \int_0^m p(t_1, x, y) \frac{\partial \delta z(t_1, x, y)}{\partial t} dy dx - \int_0^l \int_0^m \frac{\partial p(t_1, x, y)}{\partial t} \delta z(t_1, x, y) dy dx + \\
& + \int_0^l \int_0^m \frac{\partial p(t_0, x, y)}{\partial t} \delta z(t_0, x, y) dy dx + \int_{t_0}^{t_1} \int_0^l \int_0^m \frac{\partial^2 p(t, x, y)}{\partial t^2} \delta z(t, x, y) dy dx dt = \\
& = \int_0^l \int_0^m p(t_1, x, y) \frac{\partial \delta z(t_1, x, y)}{\partial t} dy dx - \int_0^l \int_0^m \frac{\partial p(t_1, x, y)}{\partial t} \delta z(t_1, x, y) dy dx +
\end{aligned}$$

$$+ \int_{t_0}^{t_1} \int_0^l \int_0^m \frac{\partial^2 p(t, x, y)}{\partial t^2} \delta z(t, x, y) dy dx dt. \quad (9)$$

Предполагая выполнение краевых условий

$$p(t, 0, y) = 0, \quad p(t, l, y) = 0 \quad p(t, x, 0) = 0, \quad p(t, x, m) = 0 \quad (10)$$

и принимая во внимание очевидные соотношения $\delta z(t, 0, y) = 0 - 0 = 0$, $\delta z(t, l, y) = 0 - 0 = 0$, после двукратного применения формулы интегрирования по частям приходим к такому равенству:

$$\begin{aligned} & \int_{t_0}^{t_1} \int_0^l \int_0^m p(t, x, y) \frac{\partial^2 \delta z(t, x, y)}{\partial x^2} dy dx dt = \int_{t_0}^{t_1} \int_0^l p(t, l, y) \frac{\partial \delta z(t, l, y)}{\partial x} dy dt - \\ & - \int_{t_0}^{t_1} \int_0^l p(t, 0, y) \frac{\partial \delta z(t, 0, y)}{\partial x} dy dt - \int_{t_0}^{t_1} \int_0^l \int_0^m \frac{\partial p(t, x, y)}{\partial x} \frac{\partial \delta z(t, x, y)}{\partial x} dy dx dt = \\ & = - \int_{t_0}^{t_1} \int_0^l \frac{\partial p(t, l, y)}{\partial x} \delta z(t, l, y) dy dt + \int_{t_0}^{t_1} \int_0^l \frac{\partial p(t, 0, y)}{\partial x} \delta z(t, 0, y) dy dt + \\ & + \int_{t_0}^{t_1} \int_0^l \int_0^m \frac{\partial^2 p(t, x, y)}{\partial x^2} \delta z(t, x, y) dy dx dt = \int_{t_0}^{t_1} \int_0^l \int_0^m \frac{\partial^2 p(t, x, y)}{\partial x^2} \delta z(t, x, y) dy dx dt. \end{aligned} \quad (11)$$

Аналогично, учитывая краевые условия $\delta z(t, x, 0) = 0 - 0 = 0$, $\delta z(t, x, m) = 0 - 0 = 0$ и условия (10), получим равенство

$$\int_{t_0}^{t_1} \int_0^l \int_0^m p(t, x, y) \frac{\partial^2 \delta z(t, x, y)}{\partial y^2} dy dx dt = \int_{t_0}^{t_1} \int_0^l \int_0^m \frac{\partial^2 p(t, x, y)}{\partial y^2} \delta z(t, x, y) dy dx dt. \quad (12)$$

Равенства (8), (9), (11) и (12) позволяют представить соотношение (7) следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta J = & \varepsilon \int_{t_0}^{t_1} \int_0^l \left[z(t_1, x, y) + \frac{\partial p(t_1, x, y)}{\partial t} \right] \delta z(t_1, x, y) dy dx + \\ & + \varepsilon \int_{t_0}^{t_1} \int_0^l \left[\frac{\partial z(t_1, x, y)}{\partial t} - p(t_1, x, y) \right] \frac{\partial \delta z(t_1, x, y)}{\partial t} dy dx + \\ & + \varepsilon \int_{t_0}^{t_1} \int_0^l \int_0^m \left[a^2 \left(\frac{\partial^2 p(t, x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p(t, x, y)}{\partial y^2} \right) + z(t, x, y) - \right. \\ & \left. - \frac{\partial^2 p(t, x, y)}{\partial t^2} \right] \delta z(t, x, y) + [u(t, x, y) + p(t, x, y) \delta u(t, x, y)] dy dx dt + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\varepsilon^2}{2} \int_0^l \int_0^m [\delta z(t_1, x, y)]^2 dy dx + \frac{\varepsilon^2}{2} \int_0^l \int_0^m \left[\frac{\partial \delta z(t_1, x, y)}{\partial t} \right]^2 dy dx + \\
& + \frac{\varepsilon^2}{2} \int_{t_0}^{t_1} \int_0^l \int_0^m \left[[\delta z(t, x, y)]^2 + [\delta u(t, x, y)]^2 \right] dy dx dt.
\end{aligned} \tag{13}$$

Подводя итоги выше приведенным рассуждениям, приходим к следующему утверждению.

Теорема 1. Единственное оптимальное управление $u(t, x, y)$ определяется из системы соотношений

$$\begin{cases}
\frac{\partial^2 z(t, x, y)}{\partial t^2} = a^2 \left(\frac{\partial^2 z(t, x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z(t, x, y)}{\partial y^2} \right) + u(t, x, y), \\
z(t_0, x, y) = f(x, y), \quad \frac{\partial z(t_0, x, y)}{\partial t} = g(x, y), \\
z(t, 0, y) = 0, \quad z(t, l, y) = 0, \quad z(t, x, 0) = 0, \quad z(t, x, m) = 0, \\
\frac{\partial^2 p(t, x, y)}{\partial t^2} = a^2 \left(\frac{\partial^2 p(t, x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p(t, x, y)}{\partial y^2} \right) + z(t, x, y), \\
p(t_1, x, y) = \frac{\partial z(t_1, x, y)}{\partial t}, \quad \frac{\partial p(t_1, x, y)}{\partial t} = -z(t_1, x, y), \\
p(t_1, x, y) = 0, \quad p(t, l, y) = 0, \quad p(t, x, 0) = 0, \quad p(t, x, m) = 0, \\
u(t, x, y) + p(t, x, y) = 0.
\end{cases} \tag{14}$$

Доказательство. Необходимым условием экстремума функционала (5) является равенство нулю его первой вариации. Это условие будет выполнено, если имеют место следующие соотношения:

$$\begin{aligned}
z(t_1, x, y) + \frac{\partial p(t_1, x, y)}{\partial t} &= 0, \quad \frac{\partial z(t_1, x, y)}{\partial t} - p(t_1, x, y) = 0, \\
a^2 \left(\frac{\partial^2 z(t, x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z(t, x, y)}{\partial y^2} \right) + u(t, x, y) - \frac{\partial^2 z(t, x, y)}{\partial t^2} &= 0, \\
a^2 \left(\frac{\partial^2 p(t, x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p(t, x, y)}{\partial y^2} \right) + z(t, x, y) - \frac{\partial^2 p(t, x, y)}{\partial t^2} &= 0, \\
u(t, x, y) + p(t, x, y) &= 0.
\end{aligned}$$

Если присоединить к этим равенствам начальные условия (2), краевые условия (3) и соотношения (10), то получим систему уравнений (14). В случае выполнения этих соотношений выражение (13) примет вид

$$\Delta J = \frac{\varepsilon^2}{2} \int_0^l \int_0^m [\delta z(t_1, x, y)]^2 dy dx + \frac{\varepsilon^2}{2} \int_0^l \int_0^m \left[\frac{\partial \delta z(t_1, x, y)}{\partial t} \right]^2 dy dx +$$

$$+ \frac{\varepsilon^2}{2} \int_{t_0}^{t_1} \int_0^l \int_0^m [\delta z(t, x, y)]^2 + [\delta u(t, x, y)]^2 dy dx dt. \quad (15)$$

При условии, что $\delta u(t, x, y) \neq 0$, имеем неравенство $\Delta J > 0$. Это означает, что на управлении $u(t, x, y)$ реализуется минимум функционала (4). Далее предположим, что управление $\bar{u}(t, x, y) = u(t, x, y) + \delta(t, x, y)$ также является оптимальным управлением. Тогда оно также должно удовлетворять соотношениям (14) и, кроме того, должно выполняться равенство $\Delta J = 0$, поскольку оба управления $\bar{u}(t, x, y)$ и $u(t, x, y)$ оптимальны. Но тогда из выражения (15) следует, что равенство $\Delta J = 0$ возможно только в том случае, когда $\delta u(t, x, y) = 0$. Отсюда следует, что $\bar{u}(t, x, y) = u(t, x, y)$, и теорема 1 полностью доказана.

Вывод системы интегро-дифференциальных уравнений Риккати

Исходя из равенств $p(t_1, x, y) = \frac{\partial z(t_1, x, y)}{\partial t}$ и $\frac{\partial p(t_1, x, y)}{\partial t} = -z(t_1, x, y)$, предполагаем существование зависимости между $p(t, x, y)$ и $z(t, x, y)$

$$\frac{\partial p(t, x, y)}{\partial t} = - \int_0^l \int_0^m R_{11}(t, x, y, s, \lambda) z(t, s, \lambda) d\lambda ds -$$

$$- \int_0^l \int_0^m R_{12}(t, x, y, s, \lambda) \frac{\partial z(t, s, \lambda)}{\partial t} d\lambda ds, \quad (16)$$

$$p(t, x, y) = \int_0^l \int_0^m R_{21}(t, x, y, s, \lambda) z(t, s, \lambda) d\lambda ds +$$

$$+ \int_0^l \int_0^m R_{22}(t, x, y, s, \lambda) \frac{\partial z(t, s, \lambda)}{\partial t} d\lambda ds, \quad (17)$$

где функции $R_{ij}(t, x, y, s, \lambda)$ ($i=1, 2; j=1, 2$) требуется найти. Дифференцируя равенство (16) по переменной t , приходим к такому соотношению:

$$\frac{\partial^2 p(t, x, y)}{\partial t^2} = - \int_0^l \int_0^m \left[\frac{\partial R_{11}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial t} z(t, s, \lambda) + R_{11}(t, x, y, s, \lambda) \frac{\partial z(t, s, \lambda)}{\partial t} \right] d\lambda ds - \quad (18)$$

$$- \int_0^l \int_0^m \left[\frac{\partial R_{12}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial t} \frac{\partial z(t, s, \lambda)}{\partial t} + R_{12}(t, x, y, s, \lambda) \frac{\partial^2 z(t, s, \lambda)}{\partial t^2} \right] d\lambda ds .$$

Поскольку из системы (14) имеем $u(t, s, \lambda) = -p(t, s, \lambda)$, то уравнение (1) примет вид $\frac{\partial^2 z(t, s, \lambda)}{\partial t^2} = a^2 \left(\frac{\partial^2 z(t, s, \lambda)}{\partial s^2} + \frac{\partial^2 z(t, s, \lambda)}{\partial \lambda^2} \right) - p(t, s, \lambda)$. Используя выражение (17), имеем

$$\frac{\partial^2 z(t, s, \lambda)}{\partial t^2} = a^2 \left(\frac{\partial^2 z(t, s, \lambda)}{\partial s^2} + \frac{\partial^2 z(t, s, \lambda)}{\partial \lambda^2} \right) - \quad (19)$$

$$- \int_0^l \int_0^m R_{21}(t, s, \lambda, \rho, \sigma) z(t, \rho, \sigma) d\sigma d\rho - \int_0^l \int_0^m R_{22}(t, s, \lambda, \rho, \sigma) \frac{\partial z(t, \rho, \sigma)}{\partial t} d\sigma d\rho .$$

Дальше, учитывая соотношение (19), равенство (18) преобразуем следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 p(t, x, y)}{\partial t^2} = & - \int_0^l \int_0^m \left[\frac{\partial R_{11}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial t} z(t, s, \lambda) + R_{11}(t, x, y, s, \lambda) \frac{\partial z(t, s, \lambda)}{\partial t} + \right. \\ & \left. + \frac{\partial R_{12}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial t} \frac{\partial z(t, s, \lambda)}{\partial t} + \right. \\ & \left. + a^2 R_{12}(t, x, y, s, \lambda) \left(\frac{\partial^2 z(t, s, \lambda)}{\partial s^2} + \frac{\partial^2 z(t, s, \lambda)}{\partial \lambda^2} \right) - \right. \\ & \left. - R_{12}(t, x, y, s, \lambda) \int_0^l \int_0^m R_{21}(t, s, \lambda, \rho, \sigma) z(t, \rho, \sigma) d\sigma d\rho - \right. \\ & \left. - R_{12}(t, x, y, s, \lambda) \int_0^l \int_0^m R_{22}(t, s, \lambda, \rho, \sigma) \frac{\partial z(t, \rho, \sigma)}{\partial t} d\sigma d\rho \right] d\lambda ds . \quad (20) \end{aligned}$$

После этого, предполагая выполнение краевых условий

$$R_{12}(t, x, y, 0, \lambda) = 0, \quad R_{12}(t, x, y, l, \lambda) = 0 \quad (21)$$

и принимая во внимание краевые условия (3), с помощью двукратного применения формулы интегрирования по частям получим

$$\begin{aligned}
& \int_0^l \int_0^m R_{12}(t, x, y, s, \lambda) \frac{\partial^2 z(t, s, \lambda)}{\partial s^2} d\lambda ds = \int_0^m R_{12}(t, x, y, l, \lambda) \frac{\partial z(t, l, \lambda)}{\partial s} d\lambda - \\
& - \int_0^m R_{12}(t, x, y, 0, \lambda) \frac{\partial z(t, 0, \lambda)}{\partial s} d\lambda - \int_0^l \int_0^m \frac{\partial R_{12}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial s} \frac{\partial z(t, s, \lambda)}{\partial s} d\lambda ds = \\
& = - \int_0^m \frac{\partial R_{12}(t, x, y, l, \lambda)}{\partial s} z(t, l, \lambda) d\lambda + \int_0^m \frac{\partial R_{12}(t, x, y, 0, \lambda)}{\partial s} z(t, 0, \lambda) d\lambda + \\
& + \int_0^l \int_0^m \frac{\partial^2 R_{12}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial s^2} z(t, s, \lambda) d\lambda ds = \int_0^l \int_0^m \frac{\partial^2 R_{12}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial s^2} z(t, s, \lambda) d\lambda ds.
\end{aligned} \tag{22}$$

Подобным образом, при выполнении краевых условий

$$R_{12}(t, x, y, s, 0) = 0, \quad R_{12}(t, x, y, s, m) = 0 \tag{23}$$

получаем следующее соотношение:

$$\int_0^l \int_0^m R_{12}(t, x, y, s, \lambda) \frac{\partial^2 z(t, s, \lambda)}{\partial \lambda^2} d\lambda ds = \int_0^l \int_0^m \frac{\partial^2 R_{12}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial \lambda^2} z(t, s, \lambda) d\lambda ds. \tag{24}$$

Кратный интеграл $\int_0^l \int_0^m R_{12}(t, x, y, s, \lambda) \int_0^l \int_0^m R_{21}(t, s, \lambda, \rho, \sigma) z(t, \rho, \sigma) d\sigma d\rho d\lambda ds$

преобразуем таким образом. Меняя в нем порядок интегрирования, изменим обозначение переменных интегрирования s на ρ , λ на σ , и, наоборот, ρ на s , σ на λ . Это приводит к следующему соотношению:

$$\begin{aligned}
& \int_0^l \int_0^m R_{12}(t, x, y, s, \lambda) \int_0^l \int_0^m R_{21}(t, s, \lambda, \rho, \sigma) z(t, \rho, \sigma) d\sigma d\rho d\lambda ds = \\
& = \int_0^l \int_0^m \int_0^l \int_0^m R_{12}(t, x, y, s, \lambda) R_{21}(t, s, \lambda, \rho, \sigma) z(t, \rho, \sigma) d\lambda ds d\sigma d\rho = \\
& = \int_0^l \int_0^m \int_0^l \int_0^m R_{12}(t, x, y, \rho, \sigma) R_{21}(t, \rho, \sigma, s, \lambda) d\sigma d\rho z(t, s, \lambda) d\lambda ds.
\end{aligned} \tag{25}$$

Подобным способом находим

$$\begin{aligned}
& \int_0^l \int_0^m R_{12}(t, x, y, s, \lambda) \int_0^l \int_0^m R_{21}(t, s, \lambda, \rho, \sigma) \frac{\partial z(t, \rho, \sigma)}{\partial t} d\sigma d\rho d\lambda ds = \\
& = \int_0^l \int_0^m \int_0^l \int_0^m R_{12}(t, x, y, s, \lambda) R_{21}(t, s, \lambda, \rho, \sigma) \frac{\partial z(t, \rho, \sigma)}{\partial t} d\lambda ds d\sigma d\rho = \\
& = \int_0^l \int_0^m \int_0^l \int_0^m R_{12}(t, x, y, \rho, \sigma) R_{21}(t, \rho, \sigma, s, \lambda) d\sigma d\rho \frac{\partial z(t, s, \lambda)}{\partial t} d\lambda ds.
\end{aligned} \tag{26}$$

На основе соотношений (22), (24), (25) и (26) равенство (20) примет вид

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 p(t, x, y)}{\partial t^2} = & - \int_0^l \int_0^m \left[\frac{\partial R_{11}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial t} z(t, s, \lambda) + R_{11}(t, x, y, s, \lambda) \frac{\partial z(t, s, \lambda)}{\partial t} + \right. \\
& + \frac{\partial R_{12}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial t} \frac{\partial z(t, s, \lambda)}{\partial t} + \\
& \left. + a^2 \left(\frac{\partial^2 R_{12}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial s^2} + \frac{\partial^2 R_{12}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial \lambda^2} \right) z(t, s, \lambda) - \right. \\
& - \int_0^l \int_0^m R_{12}(t, x, y, \rho, \sigma) R_{21}(t, \rho, \sigma, s, \lambda) d\sigma d\rho z(t, s, \lambda) - \\
& \left. - \int_0^l \int_0^m R_{12}(t, x, y, \rho, \sigma) R_{21}(t, \rho, \sigma, s, \lambda) d\sigma d\rho \frac{\partial z(t, s, \lambda)}{\partial t} \right] d\lambda ds.
\end{aligned} \tag{27}$$

С другой стороны, на основе равенства (17) имеем

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 p(t, x, y)}{\partial x^2} = & \int_0^l \int_0^m \frac{\partial^2 R_{21}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial x^2} z(t, s, \lambda) d\lambda ds + \\
& + \int_0^l \int_0^m \frac{\partial^2 R_{22}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial x^2} \frac{\partial z(t, s, \lambda)}{\partial t} d\lambda ds,
\end{aligned} \tag{28}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 p(t, x, y)}{\partial y^2} = & \int_0^l \int_0^m \frac{\partial^2 R_{21}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial y^2} z(t, s, \lambda) d\lambda ds + \\
& + \int_0^l \int_0^m \frac{\partial^2 R_{22}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial y^2} \frac{\partial z(t, s, \lambda)}{\partial t} d\lambda ds.
\end{aligned} \tag{29}$$

С помощью двумерной дельта-функции $\delta(x-s, y-\lambda) = \delta(x-s) \delta(y-\lambda)$, где $\delta(x)$ — обычная дельта-функция Дирака, получим соотношение

$$z(t, x, y) = \int_0^l \int_0^m \delta(x-s, y-\lambda) z(t, s, \lambda) d\lambda ds.$$

Подставляя это выражение в уравнение

$$\frac{\partial^2 p(t, x, y)}{\partial t^2} = a^2 \left(\frac{\partial^2 p(t, x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p(t, x, y)}{\partial y^2} \right) + z(t, x, y),$$

с учетом соотношений (28) и (29) приходим к такому равенству:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 p(t, x, y)}{\partial t^2} = & \int_0^l \int_0^m \left[a^2 \left(\frac{\partial^2 R_{21}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 R_{21}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial y^2} \right) z(t, s, \lambda) + \right. \\
& \left. + a^2 \left(\frac{\partial^2 R_{22}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 R_{22}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial y^2} \right) \frac{\partial z(t, s, \lambda)}{\partial t} + \delta(x-s, y-\lambda) z(t, s, \lambda) \right] d\lambda ds.
\end{aligned} \tag{30}$$

Сопоставление выражений (27) и (30) приводит к следующим уравнениям:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial R_{11}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial t} + a^2 \left(\frac{\partial^2 R_{12}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial s^2} + \frac{\partial^2 R_{12}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial \lambda^2} \right) + \\ & + a^2 \left(\frac{\partial^2 R_{21}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 R_{21}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial y^2} \right) - \end{aligned} \quad (31)$$

$$- \int_0^l \int_0^m R_{12}(t, x, y, \rho, \sigma) R_{21}(t, \rho, \sigma, s, \lambda) d\sigma d\rho + \delta(x-s, y-\lambda) = 0,$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial R_{12}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial t} + a^2 \left(\frac{\partial^2 R_{22}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 R_{22}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial y^2} \right) + \\ & + R_{11}(t, x, y, s, \lambda) - \int_0^l \int_0^m R_{12}(t, x, y, \rho, \sigma) R_{21}(t, \rho, \sigma, s, \lambda) d\sigma d\rho = 0. \end{aligned} \quad (32)$$

Дифференцируя равенство (17) по переменной t , получим соотношение

$$\begin{aligned} \frac{\partial p(t, x, y)}{\partial t} = & \int_0^l \int_0^m \left[\frac{\partial R_{21}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial t} z(t, s, \lambda) + R_{21}(t, x, y, s, \lambda) \frac{\partial z(t, s, \lambda)}{\partial t} \right] d\lambda ds + \\ & + \int_0^l \int_0^m \left[\frac{\partial R_{22}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial t} \frac{\partial z(t, s, \lambda)}{\partial t} + R_{22}(t, x, y, s, \lambda) \frac{\partial^2 z(t, s, \lambda)}{\partial t^2} \right] d\lambda ds. \end{aligned}$$

Используя выражение (19), последнее соотношение преобразуем таким образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p(t, x, y)}{\partial t} = & \int_0^l \int_0^m \left[\frac{\partial R_{21}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial t} z(t, s, \lambda) + R_{21}(t, x, y, s, \lambda) \frac{\partial z(t, s, \lambda)}{\partial t} + \right. \\ & + \frac{\partial R_{22}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial t} \frac{\partial z(t, s, \lambda)}{\partial t} + a^2 R_{22}(t, x, y, s, \lambda) \left(\frac{\partial^2 z(t, s, \lambda)}{\partial s^2} + \frac{\partial^2 z(t, s, \lambda)}{\partial \lambda^2} \right) - \\ & - R_{22}(t, x, y, s, \lambda) \int_0^l \int_0^m R_{21}(t, s, \lambda, \rho, \sigma) z(t, \rho, \sigma) d\sigma d\rho - \\ & \left. - R_{22}(t, x, y, s, \lambda) \int_0^l \int_0^m R_{22}(t, s, \lambda, \rho, \sigma) \frac{\partial z(t, \rho, \sigma)}{\partial t} d\sigma d\rho \right] d\lambda ds. \end{aligned} \quad (33)$$

Полагая выполнение краевых условий

$$R_{22}(t, x, y, 0, \lambda) = 0, \quad R_{22}(t, x, y, l, \lambda) = 0, \quad (34)$$

после двукратного применения формулы интегрирования по частям получим

$$\begin{aligned} & \int_0^l \int_0^m R_{22}(t, x, y, s, \lambda) \frac{\partial^2 z(t, s, \lambda)}{\partial s^2} d\lambda ds = \int_0^m R_{22}(t, x, y, l, \lambda) \frac{\partial z(t, l, \lambda)}{\partial s} d\lambda - \\ & - \int_0^m R_{22}(t, x, y, 0, \lambda) \frac{\partial z(t, 0, \lambda)}{\partial s} d\lambda - \int_0^l \int_0^m \frac{\partial R_{22}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial s} \frac{\partial z(t, s, \lambda)}{\partial s} d\lambda ds = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= -\int_0^m \frac{\partial R_{22}(t, x, y, l, \lambda)}{\partial s} z(t, l, \lambda) d\lambda + \int_0^m \frac{\partial R_{22}(t, x, y, 0, \lambda)}{\partial s} z(t, 0, \lambda) d\lambda + \\
&+ \int_0^l \int_0^m \frac{\partial^2 R_{22}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial s^2} z(t, s, \lambda) d\lambda ds = \int_0^l \int_0^m \frac{\partial^2 R_{22}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial s^2} z(t, s, \lambda) d\lambda ds. \quad (35)
\end{aligned}$$

Подобным образом с учетом краевых условий

$$R_{22}(t, x, y, s, 0) = 0, \quad R_{22}(t, x, y, s, m) = 0 \quad (36)$$

находим

$$\begin{aligned}
&\int_0^l \int_0^m R_{22}(t, x, y, s, \lambda) \frac{\partial^2 z(t, s, \lambda)}{\partial \lambda^2} d\lambda ds = \\
&= \int_0^l \int_0^m \frac{\partial^2 R_{22}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial \lambda^2} z(t, s, \lambda) d\lambda ds. \quad (37)
\end{aligned}$$

Дальше в двойном интеграле $\int_0^l \int_0^m R_{22}(t, x, y, s, \lambda) \int_0^l \int_0^m R_{21}(t, s, \lambda, \rho, \sigma) z(t, \rho, \sigma) d\sigma d\rho d\lambda ds$ сначала меняем порядок интегрирования, изменяем обозначение переменных интегрирования s на ρ , λ на σ , и, наоборот, ρ на s , σ на λ . В результате получим

$$\begin{aligned}
&\int_0^l \int_0^m R_{22}(t, x, y, s, \lambda) \int_0^l \int_0^m R_{21}(t, s, \lambda, \rho, \sigma) z(t, \rho, \sigma) d\sigma d\rho d\lambda ds = \\
&= \int_0^l \int_0^l \int_0^m \int_0^m R_{22}(t, x, y, s, \lambda) R_{21}(t, s, \lambda, \rho, \sigma) z(t, \rho, \sigma) d\lambda ds d\sigma d\rho = \\
&= \int_0^l \int_0^l \int_0^m \int_0^m R_{22}(t, x, y, \rho, \sigma) R_{21}(t, \rho, \sigma, s, \lambda) d\sigma d\rho z(t, s, \lambda) d\lambda ds. \quad (38)
\end{aligned}$$

Аналогично имеем

$$\begin{aligned}
&\int_0^l \int_0^m R_{22}(t, x, y, s, \lambda) \int_0^l \int_0^m R_{22}(t, s, \lambda, \rho, \sigma) \frac{\partial z(t, \rho, \sigma)}{\partial t} d\sigma d\rho d\lambda ds = \\
&= \int_0^l \int_0^l \int_0^m \int_0^m R_{22}(t, x, y, s, \lambda) R_{22}(t, s, \lambda, \rho, \sigma) \frac{\partial z(t, \rho, \sigma)}{\partial t} d\lambda ds d\sigma d\rho = \\
&= \int_0^l \int_0^l \int_0^m \int_0^m R_{22}(t, x, y, \rho, \sigma) R_{22}(t, \rho, \sigma, s, \lambda) d\sigma d\rho \frac{\partial z(t, s, \lambda)}{\partial t} d\lambda ds. \quad (39)
\end{aligned}$$

Соотношения (35), (37), (38) и (39) дают возможность переписать равенство (33) следующим образом:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial p(t, x, y)}{\partial t} = & \int_0^l \int_0^m \left[\frac{\partial R_{21}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial t} z(t, s, \lambda) + R_{21}(t, x, y, s, \lambda) \frac{\partial z(t, s, \lambda)}{\partial t} + \right. \\
& + \frac{\partial R_{22}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial t} \frac{\partial z(t, s, \lambda)}{\partial t} + \\
& + a^2 \left(\frac{\partial^2 R_{22}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial s^2} + \frac{\partial^2 R_{22}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial \lambda^2} \right) z(t, s, \lambda) - \\
& - \int_0^l \int_0^m R_{22}(t, x, y, \rho, \sigma) R_{21}(t, \rho, \sigma, s, \lambda) d\sigma d\rho z(t, s, \lambda) - \\
& \left. - \int_0^l \int_0^m R_{22}(t, x, y, \rho, \sigma) R_{22}(t, \rho, \sigma, s, \lambda) d\sigma d\rho \frac{\partial z(t, s, \lambda)}{\partial t} \right] d\lambda ds.
\end{aligned} \tag{40}$$

Сравнивая соотношения (16) и (40), получаем

$$\begin{aligned}
\frac{\partial R_{21}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial t} + a^2 \left(\frac{\partial^2 R_{22}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial s^2} + \frac{\partial^2 R_{22}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial \lambda^2} \right) + \\
+ R_{11}(t, x, y, s, \lambda) - \int_0^l \int_0^m R_{22}(t, x, y, \rho, \sigma) R_{21}(t, \rho, \sigma, s, \lambda) d\sigma d\rho = 0,
\end{aligned} \tag{41}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial R_{22}(t, x, y, s, \lambda)}{\partial t} + R_{12}(t, x, y, s, \lambda) + R_{21}(t, x, y, s, \lambda) - \\
- \int_0^l \int_0^m R_{22}(t, x, y, \rho, \sigma) R_{22}(t, \rho, \sigma, s, \lambda) d\sigma d\rho = 0.
\end{aligned} \tag{42}$$

Условия $p(t_1, x, y) = \frac{\partial z(t_1, x, y)}{\partial t}$, $\frac{\partial p(t_1, x, y)}{\partial t} = -z(t_1, x, y)$ и соотношения (16), (17) приводят к таким равенствам:

$$\begin{cases} R_{11}(t_1, x, y, s, \lambda) = \delta(x-s, y-\lambda), R_{12}(t_1, x, y, s, \lambda) = 0, \\ R_{21}(t_1, x, y, s, \lambda) = 0, R_{22}(t_1, x, y, s, \lambda) = \delta(x-s, y-\lambda). \end{cases} \tag{43}$$

Принимая во внимание вышеизложенные рассуждения, приходим к такому выводу.

Теорема 2. Функции $R_{ij}(t, x, y)$, $i=1, 2$; $j=1, 2$, удовлетворяют соотношениям (31), (32), (41), (42), краевым условиям (21), (23), (34), (36) и дополнительным условиям (43).

Если известны функции $R_{ij}(t, x, y)$, $i=1, 2$; $j=1, 2$, то с их помощью можно найти оптимальное управление $u(t, x, y)$.

Теорема 3. Оптимальное управление $u(t, x, y)$ имеет вид $u(t, x, y) = -p(t, x, y)$, где функция $p(t, x, y)$ задана выражением (17), в котором функция $z(t, s, \lambda)$ является решением интегро-дифференциального

уравнения с частными производными (19), удовлетворяет начальным условиям (2) и краевым условиям (3).

Выводы

В данной статье получена система интегро-дифференциальных уравнений Риккати с частными производными для линейно-квадратической задачи оптимального управления процессом колебаний прямоугольной мембраны. Решение этой системы предоставляет возможность выписать явную формулу для вычисления оптимального управления. Перспективным для дальнейшего исследования является получение аналогичных результатов для случая круглой мембраны. Важным вопросом представляется изучение поведения функций $R_{ij}(t, x, y), i=1, 2; j=1, 2$ при $t_1 \rightarrow \infty$. Также следует отметить целесообразность обобщения результатов, полученных в данной работе, на случай систем с дробными производными [7, 8].

1. Андреев Ю.Н. Управление конечномерными линейными объектами / Ю. Н. Андреев. — М. : Наука, 1976 — 424 с.
2. Ройтенберг Я.Н. Автоматическое управление / Я.Н. Ройтенберг — М. : Наука, 1971. — 396 с.
3. Бутковский А.Г. Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами / А.Г. Бутковский. — М. : Наука, 1965. — 476 с.
4. Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами / А.Г. Бутковский. — М. : Наука, 1975. — 568 с.
5. Лионс Ж.-Л. Оптимальное управление системами, описываемыми уравнениями с частными производными / Ж.-Л. Лионс. — М. : Мир, 1972. — 414 с.
6. Сиразетдинов Т.К. Оптимизация систем с распределенными параметрами / Т.К. Сиразетдинов. — М. : Наука, 1977. — 480 с.
7. Чикрий А.А., Эйдельман С.Д. Игровые задачи управления для квазилинейных систем с дробными производными Римана-Лиувилля / А.А. Чикрий, С.Д. Эйдельман // Кибернетика и системный анализ. — 2012. — № 6. — С. 66–99.
8. Эйдельман С.Д. Динамические игровые задачи сближения для уравнений дробного порядка / С.Д. Эйдельман, А.А. Чикрий // Укр. мат. журн. — 2000. — 52, № 11. — С. 1566–1583.

Получено 23.06.2014

ОРГАНИЗАЦИЯ ЭФФЕКТИВНОГО ОБМЕНА ДАНЫМИ В СЕТЕВЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

**С.В. Павлова, Ю.П. Богачук, С.В. Мельников,
А.Ю. Господарчук**

Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем НАН Украины

Рассмотрены подходы к организации надежного канала обмена данными в сетевых системах для управления удаленным динамическим объектом в реальном масштабе времени. Проанализировано влияние сетевых задержек в различных архитектурах распределенной системы управления летательным аппаратом при решении задачи расхождения. Учет указанных рекомендаций по организации передачи информации в распределенных сетевых структурах позволяет достичь существенного улучшения качества процесса управления удаленным динамическим объектом.

Ключевые слова: сеть, сетевой протокол, удаленное управление, обмен данными, прямая коррекция ошибок, распределенная система управления, управление летательным аппаратом, управление скоростными циклами.

Розглянуто підходи до організації надійного каналу обміну даними в мережевих системах для управління віддаленим динамічним об'єктом в реальному масштабі часу. Проаналізовано вплив мережевих затримок в різних архітектурах розподіленої системи управління літальним апаратом при вирішенні задачі розходження. Врахування вказаних рекомендацій з організації передачі інформації в розподілених мережевих структурах дозволяє досягти суттєвого покращення якості процесу керування віддаленим динамічним об'єктом.

Ключові слова: мережа, мережевий протокол, віддалене керування, обмін даними, пряма корекція помилок, розподілена система керування, керування літальним апаратом, керування швидкісними циклами.

ВВЕДЕНИЕ

Существующие в настоящее время системы связи, навигации, наблюдения, организации воздушного движения (ОВД), имеющие локальную зону действия, несмотря на большие поля распределенных источников радионавигационной информации связи и наблюдения, ограничены в повышении безопасности и эффективности использования авиации в отдельных зонах воздушного пространства земного шара. Именно по этой причине перспективным средством дальнейшего расширения использования воздушного пространства и обеспечения безопасности полетов в зонах земного шара, недоступных для оснащения традиционными средствами, является внедрение спутниковой системы связи, навигации и наблюдения.

Потребность в кардинальном усовершенствовании систем связи (Communication), навигации (Navigation), наблюдения (Surveillance), управления (Air Traffic Control) и организации воздушного движения (Air Traffic Management) — CNS/ATC/ATM — многократно рассматривалась Международной организацией гражданской авиации (ИКАО) [1].

Традиционная сеть авиационной электросвязи (АТН) объединяет спутниковую, ДКМВ, МВ, ДМВ подсети обмена данными, а также подсети передачи данных режима S вторичной радиолокации и шлюзов наземной сети. В настоящее время становится очевидным, что традиционный подход, при котором для каждого типа услуг строится отдельная сеть, исчерпал себя. Альтернативой этому подходу является организация мультисервисных сетей. Мультисервисная сеть представляет собой телекоммуникационную структуру, которая позволяет оказывать пользователям разнообразные услуги связи, различающиеся как по качественным, так и по количественным характеристикам. Именно такое решение позволит отказаться от многочисленных дублирующих друг друга сетей.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В основе функционирования современных вычислительных сетей лежат методы пакетной передачи и коммутации, которые реализованы на основе преобразования любого вида информации в цифровые последовательности с последующим разделением этой последовательности на пакеты, снабженные всей необходимой информацией для их идентификации, маршрутизации, коррекции ошибок. Такой подход позволяет в едином информационном русле передавать все виды информации, использовать для передачи информации различные пути и различные средства, применять универсальные средства коммутации, инвариантные относительно всех видов информации. В этом контексте вычислительная среда может рассматриваться как некоторая универсальная среда для распространения информации.

Далее будет проанализирована возможность использования существующих сетевых протоколов и каналов связи для организации удаленного управления пилотируемыми и беспилотными летательными аппаратами. Авторы не затрагивают общие принципы организации удаленного управления, рассмотренные ранее [2].

В качестве примера практической задачи удаленного управления подвижным объектом исследовалась задача траекторного управления движением летательного аппарата (ЛА).

Цель работы — проанализировать возможность использования существующих сетевых протоколов и каналов с целью выработки рекомендаций по организации передачи информации в распределенных сетевых структурах и оценить влияние сетевых задержек на качество удаленного управления подвижным объектом на примере задачи управления траекторным движением ЛА.

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРА ЗАДЕРЖЕК И ПОТЕРЬ ДАННЫХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАДИОКАНАЛОВ

Сетевая модель OSI (Open Systems Interconnection basic reference model — базовая эталонная модель взаимодействия открытых систем) выделяет семь уровней, на которых могут строиться и работать сетевые протоколы: прикладной, представительский, сеансовый, транспортный, сетевой, канальный и физический. Задержки передачи данных в канале связи могут иметь различную природу в зависимости от типа канала связи и возникать на разных уровнях.

Для радиоканалов передачи данных характерны задержки, вызванные помехами передачи данных в протоколах физического и канального уровня. Причинами помех могут являться: индустриальные объекты (высоковольтные линии электропередач, трансформаторные подстанции, электросварочное оборудование и др.); атмосферные шумы, вызванные грозовыми разрядами; интерференционные помехи, связанные с проблемой распределения частот; помехи, связанные с отголосками сигналов соседних частот; шумы, возникающие при наличии вторичных ретрансляторов (например, металлический лом, балки, контуры). Дополнительную сложность вызывает организация радиоканала для движущегося объекта. Радиоволны дециметрового диапазона, наиболее часто используемые для передачи данных, например в мобильной связи, распространяются преимущественно по прямой (слабо огибают препятствия), но при этом могут часто отражаться от различных препятствий и поверхности Земли. В таком случае говорят о многолучевом распространении сигнала. Результатом многолучевого распространения является более быстрое затухание радиосигнала, а также искажения, вызванные взаимной интерференцией отдельных лучей.

При анализе затухания уровня принимаемого радиосигнала выделяют две составляющие: быструю и медленную. Медленные замирания подчиняются логарифмически нормальному закону распределения. Интенсивность медленных флуктуаций не превышает 5–10 дБ. Быстрые замирания — результат многолучевого распространения радиосигнала. Они описываются релеевским законом распределения. Можно сказать, что затухание радиосигнала в канале связи является медленным замиранием (вследствие изменения среднего уровня сигнала при перемещении приемника сигнала), на которое накладываются быстрые замирания вследствие многолучевого распространения сигнала.

В качестве способа снижения уровня помех в радиоканале передачи данных может рассматриваться использование направленных секторных антенн с узкими диаграммами направленности. Для борьбы с быстрым затуханием и межсимвольной интерференцией вследствие многолучевого распространения может использоваться помехоустойчивое канальное кодирование — блочное и сверточное кодирование, а также перемежение.

Также для передачи данных в радиоканале может совместно использоваться несколько радиосигналов, различающихся (разнесенных) по какому-либо параметру или координате. При этом параметры выбираются

таким образом, чтобы снизить до минимума вероятность одновременного замирания всех сигналов.

ЗАДЕРЖКИ И ПОТЕРИ ДАННЫХ В СЕТЯХ С КОММУТАЦИЕЙ ПАКЕТОВ

Рассматривая работу коммуникационных протоколов на сетевом уровне, следует анализировать задержки, возникающие в процессе передачи информационных пакетов по сети. Существенными видами задержек являются задержка узловой обработки, задержка ожидания, задержка передачи и задержка распространения.

Задержки узловой обработки связаны с работой маршрутизатора. Время задержки ожидания зависит от числа пакетов, находящихся в очереди маршрутизатора и может значительно варьироваться от маршрутизатора к маршрутизатору в процессе прохождения пакета по пути от отправителя к получателю.

Задержка передачи — это суммарное время, требуемое для передачи маршрутизатором пакета по линии связи. Это время пропорционально скорости передачи по линии связи и размера пакета и не зависит от длины линии связи. Задержки передачи могут быть самым существенным видом задержек для низкоскоростных модемных соединений.

Задержка распространения — это время, требуемое на передачу бита информации по линии связи. Это время прямо пропорционально длине линии связи и зависит от физических свойств передающей среды. В современных оптоволоконных сетях скорость распространения сигнала близка к скорости света. Задержка распространения существенна для спутниковых линий связи и может превышать все остальные виды задержек.

Задержка ожидания — наиболее сложный вид задержки, к тому же это единственный вид задержки, который может иметь разные значения для разных пакетов. Можно выделить три основных фактора, влияющие на величину задержки ожидания: частоту получения пакетов, скорость передачи выходной линии связи и закон распределения получаемых пакетов во времени.

Для передачи данных реального времени в локальных и глобальных вычислительных сетях (например, при управлении динамическими процессами в реальном времени), как правило, используется протокол RTP — Real Time Protocol. RTP протокол обеспечивает упорядочивание и обработку пакетов в случае ненадежных соединений, в частности реализует процедуры восстановления цифрового потока в приемном устройстве, используя нумерацию пакетов и временные метки, определяющие начало декодирования пакетов данных.

Для расчета вероятностно-временных характеристик мультисервисных сетей, удобно разделить генерируемый различными услугами трафик на два типа: синхронный трафик, требующий передачи данных между абонентами в реальном времени (например, телеметрия, информационные и управляющие сигналы, телефония, видео- и радиолокационная информация); асинхронный трафик, не требующий реального времени (электронная почта, передача файлов).

Асинхронный и синхронный виды трафика существенно отличаются и еще в одном важном отношении — чувствительности к потере пакетов. Асинхронный трафик очень чувствителен к таким потерям. Потеря же одного замера данных не очень заметно сказывается на качестве воспроизводимого сигнала, так как инерционный характер физических процессов приводит к тому, что два последовательных замера незначительно отличаются друг от друга, поэтому воспроизводящему устройству не составляет труда восстановить, хотя и приблизительно, потерянную информацию.

Для уменьшения сетевых задержек применяется приоритетная обработка пакетов синхронного трафика. Однако даже при приоритетной обработке пакеты синхронного трафика могут задерживаться в коммуникационных устройствах, так как в них можно реализовать только алгоритмы обработки с относительными приоритетами, а не с абсолютными. При этом в сегментах разделяемых сред высокоприоритетный пакет должен ждать не только завершения передачи низкоприоритетного пакета, но и освобождения разделяемой среды. В некоторых новых протоколах предусмотрен механизм приоритетного предоставления доступа к среде. Приоритетное предоставление доступа к разделяемой среде намного уменьшает задержки доставки пакетов к узлу назначения.

Международный союз электросвязи рекомендовал при построении мультисервисных сетей использовать концепцию широкополосной цифровой сети с интеграцией служб, представляющую собой сеть пакетной коммутации по виртуальным каналам. Процедура организации виртуального канала включает в себя установление соединения. Сети с установлением соединения имеют один недостаток — устройства не могут просто передавать пакеты, они обязательно должны сначала установить соединение. Однако такие сети имеют и ряд преимуществ, в частности, могут гарантировать данному соединению определенную часть полосы пропускания. Сети без установления соединения, в которых устройства просто передают пакеты по мере их получения, не могут гарантировать полосу пропускания.

Основными параметрами, влияющими на качество предоставляемого обслуживания, являются: задержка при передаче пакетов, вариация этой задержки и уровень потерь пакетов.

Для передачи трафиков асинхронного типа выгоднее всего использовать пакеты большой длины, т.к. в этом случае передается меньше служебной информации, что повышает коэффициент использования канала связи. Единственное, что ограничивает максимальные размеры пакета, это наличие ошибок в канале связи. Для передачи трафиков синхронного типа использовать пакеты больших размеров нельзя вследствие того, что время передачи пакета прямо пропорционально его длине, а это увеличивает задержки при передаче трафиков синхронного типа.

Количество промежуточных узлов в сети существенным образом влияет на задержку в передаче трафиков синхронного типа абонентами. Передача же трафиков асинхронного типа с большим количеством промежуточных узлов (что характерно для глобальных сетей) не оказывает существенного влияния на качество предоставляемых услуг.

При передаче по сети данных реального времени типичные диапазоны задержек составляют: кодирование — 20–45 мс; задержка процессов при входе в сеть — 15–25 мс; доступ к сети — 1–8 мс; задержка на передачу по сети — 20–200 мс; выход из сети — 1–8 мс; задержка процессов при выходе из сети — 15–25 мс; компенсирующий буфер — 20–225 мс; декомпрессия — 15 мс. А общая типичная задержка передачи данных составляет 100–550 мс.

Процент потерянных пакетов может значительно меняться со временем для одного и того же канала связи. Если в качестве транспортного протокола используется TCP, то, в случае потери пакета, он должен будет послать его через сеть заново. Но для того, чтобы принять решение о повторной отправке, нужно дождаться уведомления от приемной стороны, что очередной пакет не получен. И тут на первый план выходит такой параметр сети, как задержка сигнала. Чем она больше, тем дольше передающая сторона будет в неведении и тем медленнее будет происходить передача информации. Показано [3], что основная потеря в скорости передачи в канале с типовой для WAN задержкой 50–100 мс, происходит при еще вполне, казалось бы, незначительном проценте потерь: 1–2 %.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ ПАКЕТОВ

Одним из возможных методов борьбы с проблемой потерь пакетов является использование технологий Forward Error Correction (FEC), суть которых состоит в использовании специальных методов кодирования с добавлением избыточной (дополнительной) информации. Такое кодирование позволяет исправлять некоторые ошибки и восстанавливать небольшие фрагменты потерянной информации. Проблема в том, что подобные технологии применяются, как правило, только на физическом уровне канала передачи данных и не могут устранить потери информации, связанные с перегрузками в сети, динамическими перестроениями топологии и т.д. Компанией Silver Peak предложено [3] использовать технологию FEC на канальном уровне, создавая виртуальный канал между двумя устройствами, в котором поддерживается и адаптивно подстраивается некоторое количество избыточных пакетов. Избыточный пакет позволяет восстановить потерянный регулярный пакет в приемном устройстве.

В [3] рассмотрен вопрос эффективности применения FEC для устранения потерь пакетов. Показано, что даже незначительный процент избыточности (1:10 FEC и 1:5 FEC) значительно увеличивает скорость передачи данных в канале при заданном проценте вероятности потери пакетов в канале. При этом при вероятности потери пакета 2 % и менее скорость передачи данных увеличивается в несколько раз (например, при передаче файлов большой длины по сети с типичным процентом потерь пакетов 0,1 % может быть достигнуто 15-кратное увеличение скорости передачи за счет использования технологии FEC).

Другим перспективным решением, направленным на борьбу с потерей пакетов, является новый экспериментальный сетевой протокол QUIC (Quick UDP Internet Connection, быстрое интернет-соединение через UDP), разрабатываемый компанией Google [4]. Протокол поддерживает набор

уплотненных соединений через UDP, обеспечивая при этом безопасность на уровне SSL/TLS. QUIC предполагает оценку пропускной способности для предотвращения перегрузок, после чего будет задан темп передачи пакетов для уменьшения вероятности потери пакетов. Протокол также использует встроенные в пакеты коды коррекции, которые должны позволить восстанавливать пакеты, пришедшие с ошибками, без потребности инициировать повторную передачу пакетов. Заложенные в пакеты криптографические блоки содержат необходимые инструменты, предусматривающие вероятность потери пакета при передаче.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СЕТЕВЫХ ЗАДЕРЖЕК НА ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ УДАЛЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ

Для исследования влияния стандартных сетевых задержек на практические задачи удаленного управления подвижными объектами была выбрана задача траекторного управления движением летательного аппарата (ЛА). Исследовалось совместное движение двух ЛА, каждый из которых выполнял собственное полетное задание (движение по заданному маршруту с переменным профилем полета по высоте). При этом для предотвращения столкновений и опасных сближений в воздухе моделировалась работа система TCAS II [5].

В процессе моделирования при отсутствии угроз столкновения управление высотой полета, боковым движением и скоростью полета ЛА, реализующее полетное задание (т.е. движение по заданному маршруту с переменным профилем полета по высоте) выполняется автопилотом. Во время моделирования совместного движения ЛА модель системы TCAS II контролирует расстояние между ЛА, скорость сближения, относительную высоту и относительную вертикальную скорость. В случае определения угрозы опасного сближения модель системы TCAS II формирует команды скорости набора высоты или скорости снижения.

Структурная организация системы управления ЛА, обеспечивает, благодаря присущим ей свойствам активности и функционального гомеостаза, последовательное решение одноцелевых задач при условии существования полностью управляемых состояний системы.

Современный уровень развития сетевых технологий позволяет использовать компьютерные сети с пакетной передачей информации для реализации распределенных в пространстве интегрированных навигационных систем интеллектуального управления ЛА. В этом случае система управления ЛА находится вдалеке от летательного аппарата, обмен данными между летательным аппаратом и системой управления осуществляется по сетям WAN. В такой схеме сети WAN также используются для получения информации о встречных ЛА, погодных условиях и пр.

Основными параметрами, влияющими на качество работы такой распределенной в навигационной компьютерной сети системы управления ЛА, являются величина задержки, смещающая во времени пакеты данных при передаче их в систему управления ЛА, и величина задержки, смещающая

во времени пакеты команд управления при передаче их на ЛА. Влияние этих задержек особенно сказывается на тех процессах управления воздушным движением, у которых необходимое время дискретизации данных процесса управления ЛА меньше задержек передачи пакетов в компьютерной сети.

Была предложена инвариантная к временным задержкам структурная организация распределенной в сети системы управления ЛА [6], позволяющая значительно повысить качество и устойчивость работы распределенной в навигационной компьютерной сети системы управления ЛА в широком диапазоне задержек передачи пакетов данных. При этом распределенная вычислительная среда включает в себя моделирующий комплекс, который, в свою очередь, содержит модели управляемого летательного аппарата, его бортовой системы управления и внешней среды. Второй важной частью распределенной вычислительной среды является модуль выработки траекторий и алгоритмов управления.

В процессе моделирования анализ характера совместного движения ЛА основывается на численном решении во временной области систем дифференциальных уравнений, описывающих движение летательных аппаратов при заданных начальных условиях с частотой дискретизации данных 50 мс. Задержка пакетов данных в навигационной компьютерной сети при передаче их в систему управления ЛА варьировалась в диапазоне 50–550 мс. Задержка пакетов команд управления при передаче их от системы управления на ЛА во время моделирования также варьировалась в диапазоне 50–550 мс, т.е. суммарная задержка передачи пакетов данных и пакетов команд варьировалась в диапазоне 100–1100 мс.

В процессе моделирования исследовалась работа трех систем управления ЛА: первая — тестовая (локально расположенная без передачи пакетов по компьютерной сети) система управления ЛА; вторая — распределенная в компьютерной сети система управления ЛА аналогичная тестовой, но с задержками передачи пакетов данных и пакетов команд управления по сети; третья — инвариантная к временным задержкам передачи пакетов данных распределенная в компьютерной сети система управления ЛА.

Работа каждой из трех систем управления движением ЛА исследовалась в широком спектре начальных условий для выполнения задач управления движением ЛА в различных видах потенциально опасных ситуаций: движение ЛА на встречных или попутных уровнях по одной трассе; движение ЛА с пересечением встречных или попутных уровней; движение ЛА с набором высоты в одном направлении; движение ЛА со снижением высоты в одном направлении; движение ЛА с набором высоты на встречных курсах; движение ЛА со снижением высоты на встречных курсах; движение ЛА со снижением и набором высоты на пересекающихся курсах.

По результатам моделирования проводилось сравнение качества работы второй и третьей распределенных систем управления ЛА с первой тестовой локальной системой управления ЛА. Для оценки качества работы второй и третьей распределенных систем управления ЛА использовались максимальные абсолютные значения отклонений оцениваемых параметров от аналогичных параметров первой тестовой локальной системой управления ЛА в каждой исследуемой задаче управления движением ЛА. Полученные

результаты экспериментов усреднялись по всей серии исследуемых задач управления движением ЛА. Оценка качества работы второй и третьей распределенных систем управления ЛА производилась по координатам, скоростям и ускорениям.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные по результатам экспериментальных исследований значения ошибок работы по координатам, скоростям и ускорениям второй и третьей распределенных систем управления ЛА показаны на рис. 1–3.

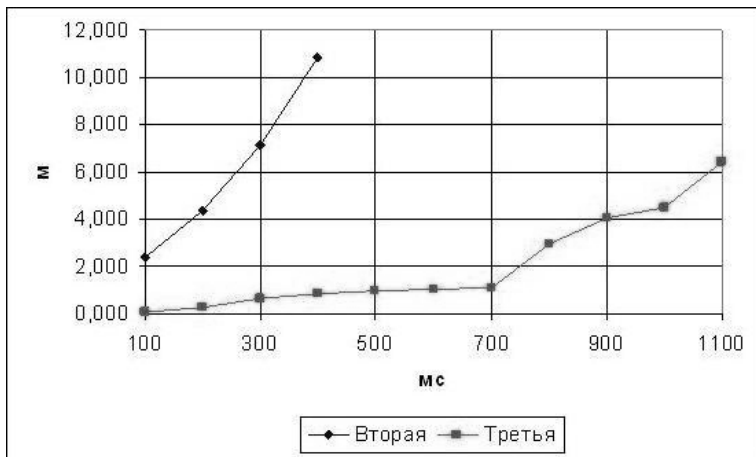


Рис. 1. Величины ошибок работы системы управления ЛА по координатам (м)

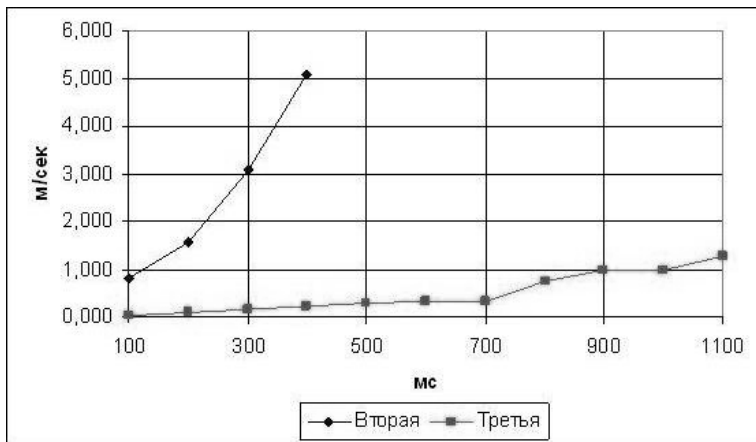


Рис. 2. Величины ошибок работы системы управления ЛА по скорости (м/сек)

Результаты проведенных исследований показали, что качество работы второй, распределенной в компьютерной сети системы управления ЛА, неудовлетворительно даже при наличии суммарных задержек передачи пакетов данных и пакетов команд в пределах 200–300 мс, а при суммарных задержках передачи пакетов данных и пакетов команд, больших 400 мс, эта система управления не достигает целей управления.

В тоже время результаты исследований работы третьей инвариантной к временным задержкам передачи информации распределенной системы

управления ЛА показали, что эта система обеспечивает качество управления сопоставимое с качеством работы тестовой локальной системы управления ЛА при наличии наиболее типичных для реальных сетей суммарных сетевых задержек передачи пакетов данных и пакетов команд в диапазоне 100–700 мс.

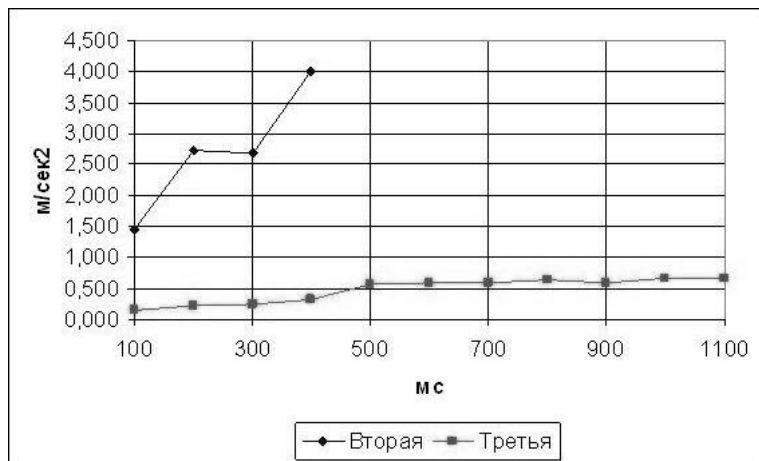


Рис. 3. Величины ошибок работы системы управления ЛА по ускорению (м/сек за сек)

Кроме того, третья инвариантная к сетевым задержкам передачи пакетов данных и пакетов команд распределенная система управления ЛА позволила при незначительном снижении качества все же достигнуть целей управления движением ЛА по заданному маршруту с переменным профилем полета по высоте и предотвратить опасные сближения ЛА для всего спектра начальных условий движения ЛА в расширенном диапазоне задержек передачи пакетов данных и пакетов команд в пределах 700–1 100 мс.

Выводы

Для эффективного функционирования систем управления с распределенными информационными и исполнительными ресурсами в разнородных навигационных сетях и при использовании системных средств, удаленных относительно объекта управления, требуется комплексное целостное рассмотрение всех элементов процессов управления и учет следующих рекомендаций: распределение управляющей информации по значимости относительно целей управления и допустимых задержек при ее передаче; определение спецификации протоколов передачи данных для различных типов информации; определение целесообразности использования различных каналов и маршрутов передачи информации; установка приоритетов значимости данных и последовательности их передачи в структурах передачи информации; создание структур, обеспечивающих дублирование или избыточность передаваемых данных при организации трафика передаваемой информации; определение структуры распределения частей системы и объекта управления в зависимости от возможных интервалов задержек сигналов управления.

Как показано в приведенных ранее данных комплексное использование указанных рекомендаций позволяет на порядок повысить эффективность передачи управляющей информации в распределенных сетевых структурах (например, при передаче файлов большой длины по сети с типичным процентом потерь пакетов 0,1 % может быть достигнуто 15-кратное увеличение скорости передачи за счет использования технологии FEC).

Кроме учета общесистемных требований при передаче информации могут быть использованы и дополнительные возможности организации управляющих структур, которые учитывают разработанные способы для управления скоростными динамическими процессами и структуры распределения средств управления на объекте и системе управления, что позволяет дополнительно в разы улучшить управление динамическим объектом.

Одновременное применение разработанных способов управления скоростными динамическими процессами и применение предлагаемых рекомендаций по организации передачи информации в распределенных сетевых структурах позволяет достичь существенного улучшения качества процесса управления удаленным динамическим объектом.

1. Doc 9750-AN/963, 2013–2028 Global Air Navigation Plan. — International Civil Aviation Organization, 2013. — 128 p.
2. Мельников С.В. Закономерности организации сложных эргатических систем и построение структуры комплексов удаленного управления динамическими объектами / С.В. Мельников // Кибернетика и вычисл. техника. — 2012. — № 168. — С. 70–79.
3. Taking Forward Error Correction (FEC) To The Next Level. Silver Peak [Official website]. White Paper. Available at: https://www.silver-peak.com/sites/default/files/infectr/silver-peak_wp_fec.pdf (accessed 4 June 2014).
4. QUIC: Design Document and Specification Rational. Google Documents [Official website]. Available at: https://docs.google.com/document/d/1RNHkx_VvKWyWg6Lr8SZ-saqsQx7rFV-ev2jRFUoVD34/edit (accessed 4 June 2014).
5. Airworthiness and Operational Approval of Traffic Alert and Collision Avoidance Systems (TCAS II) and Mode S Transponders. — U.S. Dept. of Transport. Federal Aviation Administration, 2002. — 51 p.
6. Способ и устройство для компьютерных сетей управления скоростными циклами прикладных процессов: пат. 83118 Украина: МПК (2006), H04L 12/66, G05B 15/02, G05B 17/00 / В.В. Павлов, С.В. Павлова, Ю.П. Богачук; Заявлено 08.09.2006; Опубл. 10.06.2008 // Промислова власність. — 2008. — № 11.

Получено 05.06.2014

Информатика и информационные технологии

УДК 007.12: 37.091.27: 612.825.8:613.685

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫСОКОЙ НАДЕЖНОСТИ ОПЕРАТОРСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В.В. Кальниш, А.В. Швец

Научно-исследовательский институт проблем военной медицины УВМА

Выявлены фундаментальные причины появления ошибочных действий оператора, основанные на несовершенстве имеющихся знаний о регулируемых процессах и неполноте правил, регламентирующих действия оператора в особых ситуациях. Разработана информационная технология психофизиологического обеспечения высокой надежности операторской деятельности, включающая блоки: психофизиологической оценки надежности операторской деятельности по интегральным характеристикам, параметрам предельной возможности осуществления деятельности и профилю ее надежности, основанном на характеристиках аллометрической модели; коррекции надежности деятельности оператора с помощью тренировки профессионально важных качеств; мониторинга психофизиологических качеств.

Ключевые слова: информационная технология, иерархическая информационная модель, аллометрическая модель, надежность операторской деятельности.

Виявлено фундаментальні причини появи помилкових дій оператора, засновані на недостатності наявних знань про урегульованість процесів і неповноті правил, що регламентують дії оператора в особливих ситуаціях. Розроблено інформаційну технологію психофізіологічного забезпечення високої надійності операторської діяльності, яка включає декілька блоків: психофізіологічної оцінки надійності операторської діяльності за інтегральними характеристиками, параметрами граничної можливості здійснення діяльності та профілю її надійності, заснованому на характеристиках алометричної моделі; корекції надійності діяльності оператора за допомогою тренування професійно важливих якостей; моніторингу психофізіологічних якостей.

Ключові слова: інформаційна технологія, ієрархічна інформаційна модель, алометрична модель, надійність операторської діяльності.

*«Я ошибаюсь, следовательно
я существую» (Августин Аврелий
«О Граде Божием, книга XI, 26 – 427 г.)*

ВВЕДЕНИЕ

Проблема психофизиологического обеспечения высокой надежности операторской деятельности существует давно и имеет достаточно много теоретических [1–3] и практических результатов [4–5]. Вместе с тем

© В.В. Кальниш, А.В. Швец, 2014

ISSN 0452-9910. Кибернетика и вычисл. техника. 2014. Вып. 177

совершенствование техники и технологий, постоянное появление новых профессиональных групп и т.п. делают изучение этого вопроса актуальным на всех этапах развития человечества. Очень четко определил смысл этой проблемы академик А.И. Берг, назвав ее вечной [6]. Поэтому современные исследователи по-прежнему уделяют этому направлению достаточно много внимания.

Для правильного понимания понятия надежности деятельности уместно будет дать ее толкование как вероятностного показателя, характеризующего способность человека безотказно, эффективно и с необходимой точностью осуществлять эту деятельность в течение определенного времени при определенных условиях [7–9]. С кибернетической точки зрения, проблема надежности операторской деятельности рассматривается с позиций функционирования эргатической системы либо эргамата [10–11].

В психофизиологическом понимании категория надежности главным образом рассматривалась в контексте методов ее определения: как вероятность безошибочной работы [12], стабильность характеристик точности [13], способность поддерживать рабочие параметры в условиях действия экстремальных факторов [14], запас резервных возможностей человека, которые могут быть дополнительно подключены его организмом при осуществлении деятельности в случае осложнения ситуации [15], функциональные резервные возможности организма, уровень мотивации, индивидуальный стиль деятельности и др., имеющие существенную информационную составляющую [16–17]. Анализ этих характеристик показывает, что проблема надежности оператора выросла из проблемы появления у него ошибок [1, 18].

Как видно из изложенного, для многих научных исследований характерным является технократическое (с позиций теории надежности технических систем) понимание психофизиологических механизмов обеспечения надежности деятельности человека. Это нашло свое отражение в доминировании вероятностных методов определения надежности, которые давали хорошие результаты в технической кибернетике и других технических науках, но применительно к деятельности человека показали свою ограниченность.

При определении механизмов формирования профессиональной надежности целесообразно опираться на представление Л.Г. Дикой [19] о множественности и разнопорядковости существующих механизмов регуляции надежности человека, поскольку организованность любой материальной системы проявляется в интеграции функций ее структурных компонентов [20–21]. Следовательно, надежность деятельности человека-оператора является сложным параметром, в котором необходимо учитывать и семантические (содержательные) аспекты и темп деятельности, сложность, интенсивность, последовательность заданий и возникающих вследствие этого информационных перегрузок [3–5]; разнообразных внешних воздействий, а также качественные характеристики деятельности (статическая или динамическая) [2, 22].

Целью работы является создание информационной технологии, направленной на осуществление психофизиологического обеспечения высокой надежности операторской деятельности.

Материалы и методы. В качестве объекта исследований была взята однородная группа операторов (40 мужчин, возраст 18–23 года), которые выполняли профессиональные обязанности радиотелеграфиста в течение суток. Исследование психофизиологических характеристик этих лиц проводили в утреннее время (с 800 до 900 часов) до начала суточного дежурства и непосредственно после него [20]. Анализ результатов проводился с помощью следующих методов: нелинейного регрессионного, кластерного и двухфакторного дисперсионного анализа с использованием пакета программ STATISTICA 6.1.478.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Иерархическая информационная модель формирования надежности операторской деятельности. Рассмотрение такого сложного понятия как надежность деятельности требует применения современного системного подхода. Анализ организации воздействий управляющих стимулов в эргатической системе путем учета влияния подсистем высшего уровня для объяснения функционирования подсистем низшего уровня отражен в теореме Геделя о неполноте [23]. Согласно этой теореме многие качества системы не могут быть поняты исключительно из свойств ее самой, а только с позиций системы более высокого уровня. Как постулировали И.М. Гельфанд и соавторы [24], целесообразное поведение управляющих систем порождается рациональным поведением образующих их подсистем, для каждой из которых все остальные относятся к внешней среде. Поэтому целесообразность функционирования всей системы проявляется как минимизация суммарного взаимодействия системы со средой, что нарушается при изменении параметров внешней среды на определенном уровне. В последнем случае действие принципа наименьшего взаимодействия с течением времени приводит к новому устойчивому режиму, обеспечивающему минимизацию взаимодействия в изменившейся среде. Поэтому для более полного понимания роли информационных процессов, имеющих разную природу и формирующих надежность операторской деятельности на разных уровнях иерархически организованной системы человек — машина — окружающая среда, необходимо детально рассмотреть особенности взаимопроникновения влияния этих процессов (рис. 1).

Здесь целесообразно отметить, что на надежность деятельности на уровне «человек» потенциально влияют такие параметры его организма, как пол [25], возраст [18], уровень развития профессионально важных качеств [5], функциональное состояние [22] и т.д.

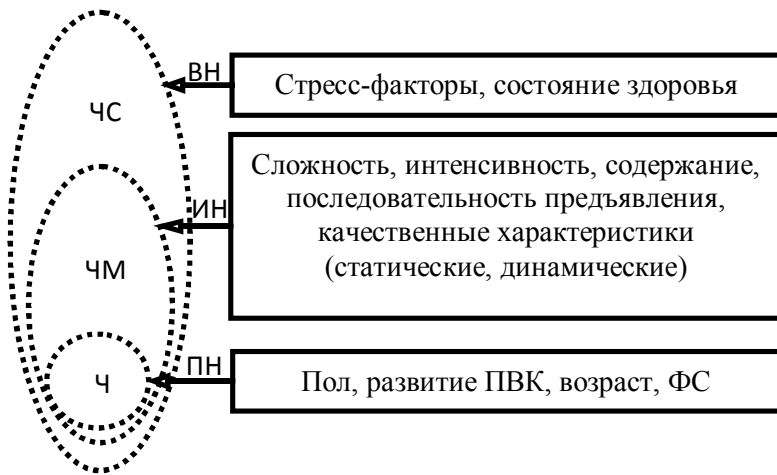


Рис. 1. Структурно-функциональная схема формирования надежности операторской деятельности с учетом влияния комплекса системообразующих факторов:

Ч — человек; М — машина; С — окружающая среда; ИН — истинная надежность; ПН — потенциальная надежность; ВН — вероятная надежность; ПВК — профессионально важные качества, ФС — функциональное состояние; ← — фактор, воздействующий на структурные элементы эргатической системы

Вместе с тем, если рассматривать человека в момент, пока еще нет деятельности, изучаемая надежность имеет лишь потенциальный характер, т.е. не может быть проанализирована без наличия самой деятельности (Ч). Иными словами, потенциальная надежность (ПН) зависит только от личных возможностей человека выполнять данную работу, но на нее пока не влияют информационные нагрузки, свойственные самой операторской деятельности. Когда человек попадает на рабочее место и осуществляет свою деятельность — только в этом случае проявляется «истинная» надежность (ИН).

Операторская деятельность непосредственно связана с переработкой самой разнообразной информации, которую предъявляет машина (Ч-М). При неодинаковой сложности решаемых заданий и интенсивности их предъявления, а также вследствие действия других факторов и их сочетаний, возникают существенно различающиеся неаддитивные ситуации, способствующие появлению ошибок. Свидетельством этому могут служить данные о времени и количестве операций, выполняемых работником (например, диспетчером электрических сетей) в штатной и аварийной ситуациях [26–27], которые в значительной мере определяют адекватность его ответных действий. Было четко показано, что работа в аварийной ситуации в значительной мере отличается от таковой в штатной по величине нагрузки на те или иные психофизиологические функции работающего человека [28].

При анализе действия на человека подсистемы более высокого уровня (Ч-С) обращает на себя внимание влияние как на его организм, так и на результаты его деятельности фонового состояния здоровья и многочисленных стресс-факторов, имеющих разнообразную природу [22]. Необходимо четко осознавать, что на этом уровне отмеченное влияние,

отчасти, является косвенным и формирует вероятную надежность деятельности (ВН).

Таким образом, предложенная иерархическая модель включает в себя воздействие многообразных факторов среды и характеристик организма человека, существенным образом влияющих на формирование надежности операторской деятельности и позволяет более полно оценивать этот параметр и разрабатывать адекватные медицинские мероприятия по поддержанию его высокого уровня.

Информационный блок оценки надежности операторской деятельности. Изучаемая эргатическая система представляется как нечто единое, одновременно являющееся и ареной, и объектом развития. В процессе осуществления профессиональной деятельности человек активно преобразует решаемую задачу и эволюционирует сам, постоянно адаптируясь к измененной им среде (рис. 2). Вместе с тем, если действие параметров задания на организм человека является бесспорным, то обратное воздействие человека на характеристики задания не выражается столь явно. Однако анализ надежности деятельности со всей очевидностью свидетельствует о том, что при выполнении задания человек существенным образом трансформирует его параметры и тем самым постоянно меняет характеристики своего задания, особенно в ситуациях появления ошибки.

В этом случае можно утверждать, что условия появления ошибок не являются аддитивными и поэтому оценка надежности с помощью определения вероятности ошибочной деятельности, т.е. путем суммирования количества ошибок, появляющихся в разных обстоятельствах, и отнесения их к общему числу проведенных действий не способствует получению объективного и точного результата. Учет этого обстоятельства совершенно игнорируется при оценке надежности традиционным способом, как вероятности безошибочности (или ошибочности) его профессиональной деятельности.

Таким образом, для более полного анализа надежности необходимо или учесть этот важный аспект деятельности, или постараться максимально исключить его проявления. Отсюда формируется чрезвычайно важная задача построения такой информационной технологии, которая бы учитывала отмеченный феномен. Поэтому для ее реализации целесообразно применять несколько подходов.

Первый подход состоит в использовании специальных комплексных показателей, учитывающих воздействие на поведенческие реакции работающего человека фундаментальных характеристик его организма (пол, возраст, выраженность ПВК и др.). Преимуществом этого подхода является достаточная легкость и доступность получения интегральных индикаторов надежности деятельности. Здесь, конечно, нельзя непосредственно определить уровень ПН, поскольку для получения результата необходимо предложить человеку проделать определенную работу, однако его можно косвенно оценить с помощью приемов информатики, направленных на получение интегральных показателей (оценка надежности деятельности по комплексу психофизиологических параметров: функциональное состояние, вариабельность сердечного ритма, особенности электрической активности

коры головного мозга, личностные характеристики и т.д.), в частности использования методов нечеткой логики [22, 25, 29].

Второй подход определения надежности направлен на возможное уменьшение влияния человека на характеристики задания, что делает технологию его выполнения более трудоемкой, но физиологически адекватной, поскольку каждый оператор работает на максимуме своих возможностей, которые предельно сужают степени его свободы при выборе решений, ограничивая его влияние на параметры решаемого задания (рис. 2).

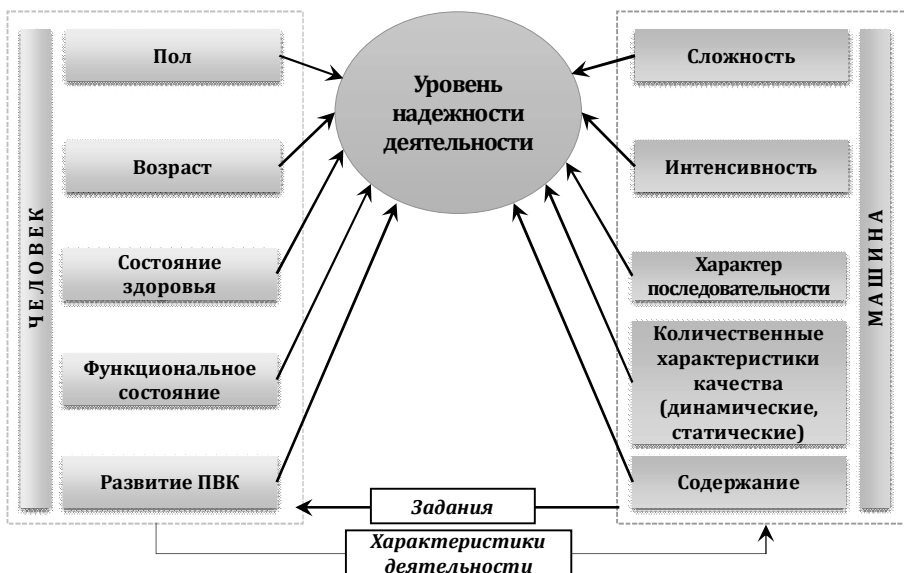


Рис. 2. Информационная модель действий человека и функционирования машины в эргатической системе

Для осуществления рассматриваемого подхода предлагается применить модуль информационной технологии, использующий параметры предельной возможности осуществления деятельности. Этот модуль реализуется в несколько этапов: подготовительный (I) для определения предельных возможностей человека по переработке потока информации и оценочный (II), позволяющий определить уровень надежности деятельности в условиях максимальной нагрузки на человека (рис. 3).

Для реализации процедур первого этапа применяется прием с использованием отрицательной обратной связи, которая позволяет адекватно изменять сложность предъявляемых задач в зависимости от успешности их решения.

Описанное правило можно рассмотреть на примере оценки надежности операторской деятельности по временным характеристикам предъявляемого сигнала, которое целесообразно формализовать с помощью понятия

проколотой окрестности $\overset{\circ}{U}$, существование которой отвечает условиям: $\forall \tau_t \in \overset{\circ}{U}(\tau_{t-1}): f(\tau_t) < f(\tau_{t-1})$ или $\forall \tau_t \in \overset{\circ}{U}(\tau_{t-1}): f(\tau_t) > f(\tau_{t-1})$, где τ_t — текущее значение функции f (отражающей временную последовательность

изменений экспозиций раздражителя в процессе подготовительного этапа исследования). В результате выполнения этого задания определяется предельное время действия раздражителя — τ_{lim} , при котором оператор еще может дать правильный ответ.

Второй подход может быть разделен на несколько этапов, позволяющих, отталкиваясь от точки τ_{lim} , конструировать тестирование испытуемого с постоянной экспозицией раздражителя, отличающейся от τ_{lim} на заданную величину (Δ).

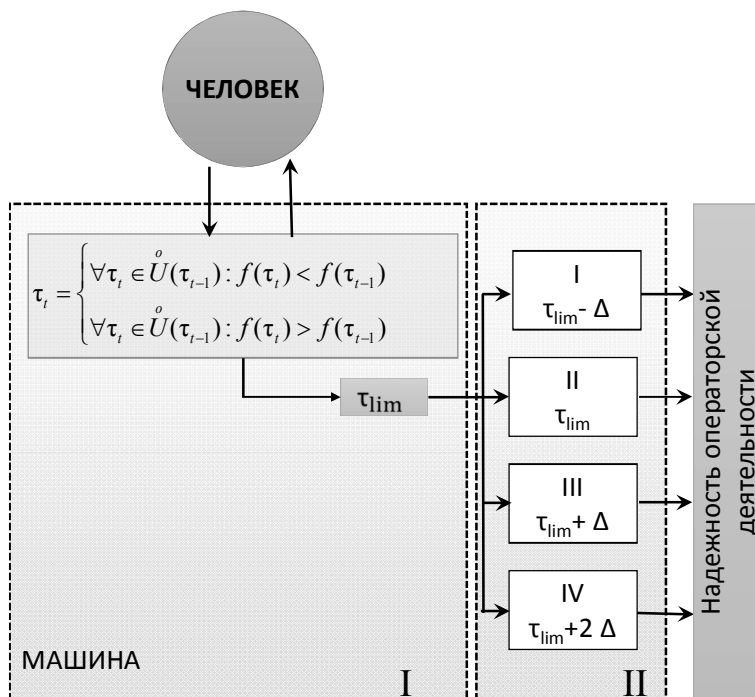


Рис. 3. Этапы реализации модуля информационной технологии психофизиологической оценки надежности операторской деятельности с использованием параметров предельной возможности ее осуществления

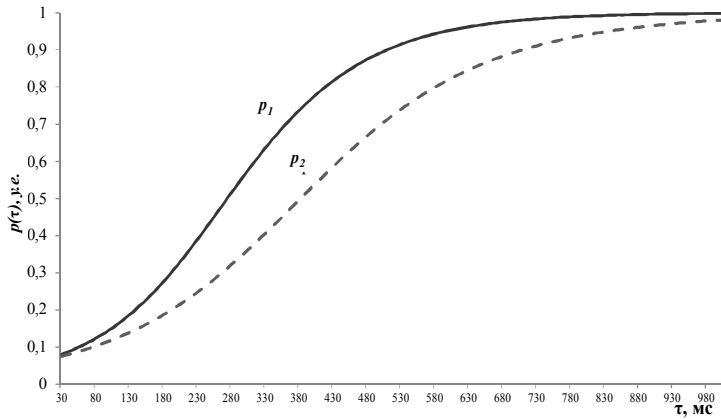
Третий подход основан на использовании данных тестирования с применением обратной связи и учитывает тот очевидный факт, что при достаточно медленном предъявлении заданий оператор может долго безошибочно работать. При уменьшении экспозиции задания вероятность появления ошибки растет и в режиме подачи раздражителей, превышающем возможности человека по переработке данного вида информации, вероятность появления ошибки будет равна единице. Иными словами, деятельность оператора в широком диапазоне сложностей предъявляемых заданий может универсально описываться аллометрической кривой. Формула, описывающая эту кривую, имеет вид $p(\tau) = \frac{1}{1 + e^{(a-b\tau)}}$, где $p(\tau)$ — вероятность надежности деятельности; τ (мс) — экспозиция предъявляемого сигнала; a и b — коэффициенты, отражающие

функциональное состояние и уровень развития профессионально важных качеств оператора.

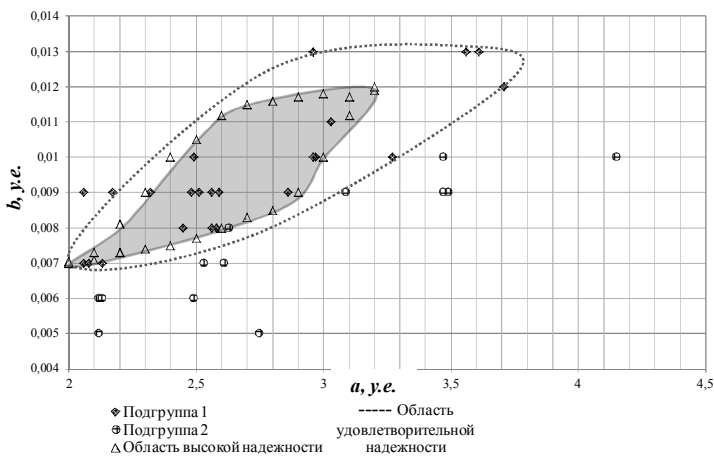
Для реализации этого подхода предлагается еще один **модуль информационной технологии, основанный на анализе параметров аллометрической кривой, описывающей надежность операторской деятельности в широком диапазоне интенсивности информационной нагрузки.** Основной идеей реализации этого модуля является анализ параметров логистической функции, отражающей согласованную совокупность характеристик деятельности и представляющей собой линию, построенную по комплексу значений, отображающих соответствие вероятности правильного решения потока задач и скорости их предъявления, демонстрирующих трансформацию параметра надежности деятельности при усложнении перерабатываемой информации. Такая кривая является «профилем надежности деятельности» (ПНД) [30]. При этом ПНД отражает не только формальную сторону изменения надежности деятельности от темпа предъявления заданий в разнообразных условиях и режимах, но и может служить характеристикой изменения функционального состояния, выраженности профессионально важных качеств оператора. Эта технология, состоящая из двух этапов, позволяет существенно уменьшить (примерно в пять раз) время проведения исследования надежности операторской деятельности, не теряя при этом качества оценки надежности деятельности.

Примером использования предложенной информационной технологии является оценка надежности деятельности у операторов-радиотелеграфистов. Были построены логистические кривые, описывающие ПНД операторов по данным решения тестовых задач в конце смены, когда работники вследствие накопленной усталости были склонны делать большее количество ошибок. Для выделения однородных групп по степени надежности деятельности операторов был проведен кластерный анализ индивидуальных ПНД. В результате были выделены две подгруппы лиц, различающихся по уровню надежности (рис 4, а). В подгруппу 1 (p_1) попали радиотелеграфисты, надежность деятельности которых, исходя из результатов двухфакторного дисперсионного анализа, достоверно выше ($p < 0,001$), чем в подгруппе 2 (p_2).

Второй этап основывался на установлении области колебаний коэффициентов a и b логистической кривой, отражающей ПНД операторов с «высоким» уровнем надежности профессиональной деятельности. Был получен среднегрупповой или «нормативный» (по группе с «высоким» уровнем надежности) профиль — ПНД_н. Именно ПНД_н является удовлетворительным при выполнении операторами своих служебных обязанностей. Далее с помощью метода Монте-Карло и двухфакторного дисперсионного анализа была выявлена область, где индивидуальное ПНД еще могло трактоваться как ПНД, принадлежащее континууму ПНД_н с вероятностью $p < 0,05$ для лиц с «высокой» или $p < 0,1$ для лиц с «удовлетворительной» надежностью (рис. 4, б). Имея координаты выделенной области ПНД_н можно по значениям коэффициентов a и b индивидуальных ПНД принимать решение о надежности операторской деятельности конкретного человека.



a



b

Рис. 4. Информационная технология оценки ПНД операторов:
 a — ПНД подгруппы с высокой (— подгруппа 1) и низкой (- - - подгруппа 2) надежностью деятельности; $p(\tau)$ — вероятность надежной деятельности;
 б — соответствие характеристик индивидуальных ПНД (a и b) нормативной области (высокой и удовлетворительной) надежности деятельности операторов.

Информационный блок коррекции надежности операторской деятельности. Коррекция надежности деятельности операторов может осуществляться с помощью тренировок психофизиологических качеств с постоянной оценкой степени их совершенствования (рис. 5). Коррекция психофизиологических качеств проводится в несколько этапов (оценка исходного уровня ПВК, ознакомление с методикой, тренировка психофизиологических качеств с динамическим контролем их уровня в течение дневного (j) и недельного (i) циклов). Результатом тренировки является наличие позитивного эффекта в повышении относительного сдвига уровня ПВК не менее чем на 0,3.

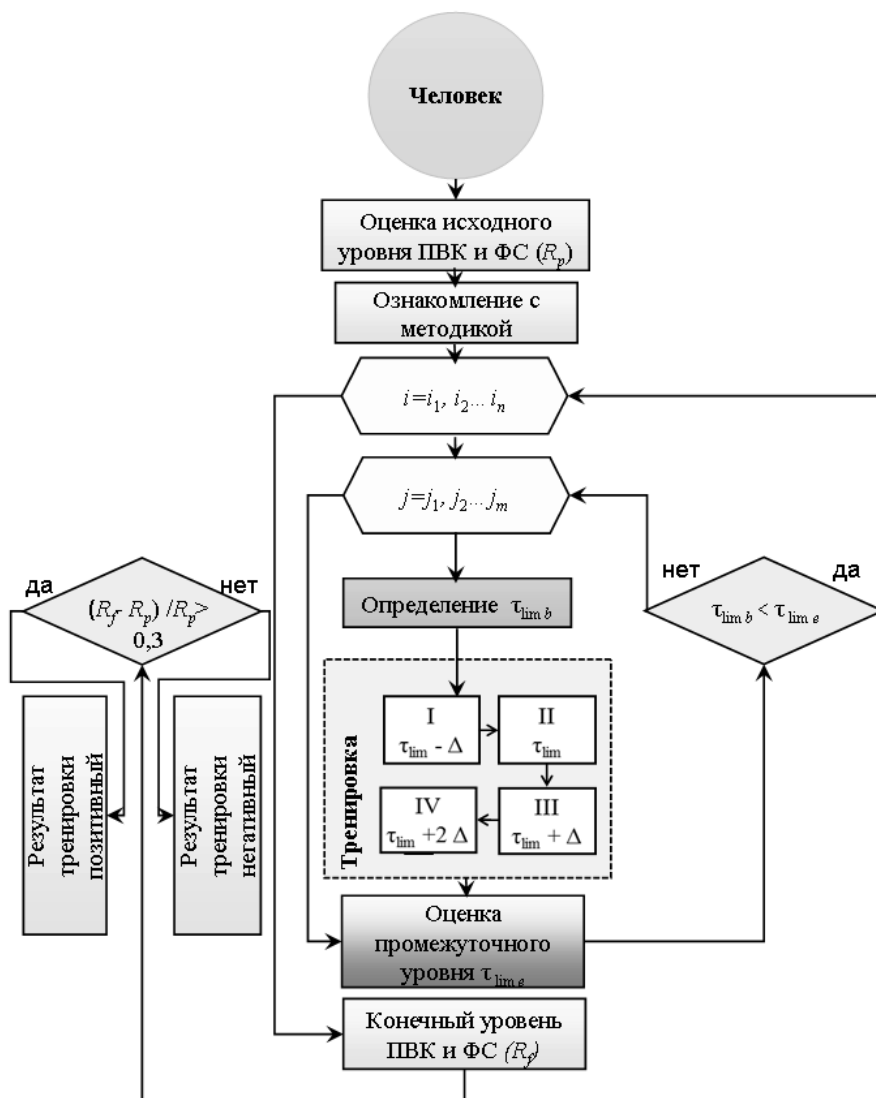


Рис. 5. Информационная технология коррекции (тренировки и контроля) психофизиологических качеств оператора: i_n — количество циклов тренировок в неделю; j_m — количество циклов тренировок в день ($m =$ от 1 до 3); $\tau_{lim b}$ — исходный временной уровень предельных возможностей по переработке информации; $\tau_{lim e}$ — промежуточный временной уровень предельных возможностей по переработке информации после каждого j_m цикла тренировки.

Информационный блок мониторинга психофизиологических качеств оператора. В условиях профессиональной деятельности целесообразно проводить мониторинг надежности профессиональной деятельности, а также ФС и, в случае необходимости, проведение комплекса лечебно-профилактических мероприятий, осуществляемых под наблюдением врача. Разработанный блок информационной технологии включает несколько

этапов (периодического контроля надежности операторской деятельности и проведения профилактических, тренировочных, превентивных реабилитационных или лечебных процедур, направленных на коррекцию ФС оператора). В случае позитивного действия применяемых мероприятий рекомендуется продолжение профессиональной деятельности. Негативный результат дает информацию врачу и руководству учреждения о рекомендации работнику сменить направление деятельности (рис. 6).

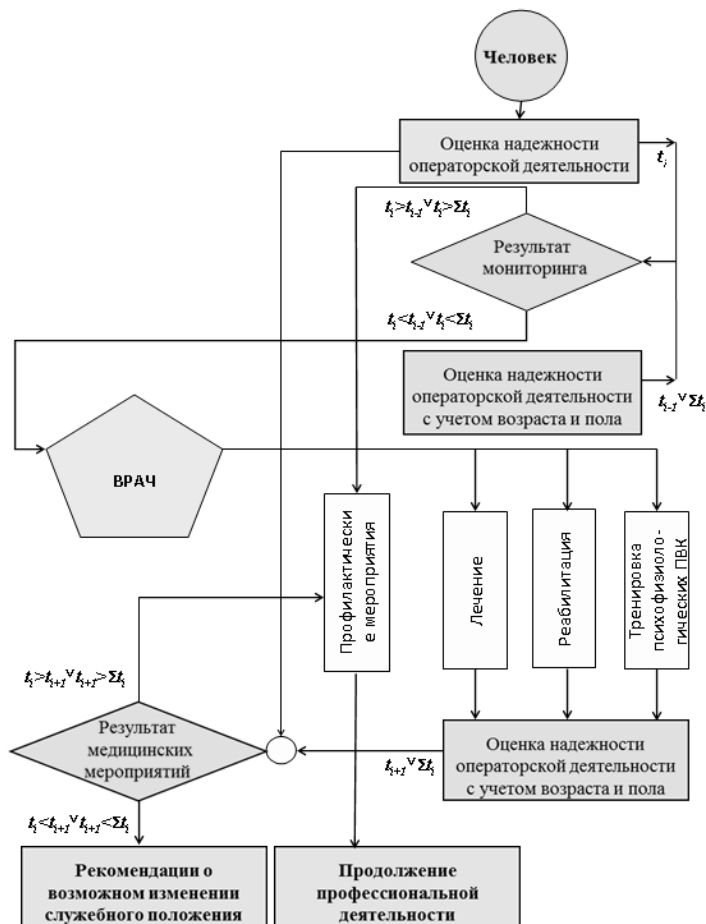


Рис. 6. Информационный блок мониторинга психофизиологических качеств оператора и лечебно-профилактических мероприятий, направленных на поддержание высокой надежности операторской деятельности: t_i — характеристики текущей надежности деятельности оператора; t_{i-1} — оценка надежности операторской деятельности в предыдущий период времени; t_{i+1} — оценка надежности операторской деятельности после проведения лечебно-профилактических мероприятий.

Врач в этом блоке является ключевым звеном, принимающим решение о целесообразности выполнения определенных мероприятий на основании информации, получаемой от блока оценки надежности операторской деятельности. К ним относятся: тренировка ПВК операторов, ПНД которых находится в зоне удовлетворительной надежности; превентивная реабилитация при наличии донозологических состояний (переутомление,

нервно-психическое перенапряжение, хроническое утомление); лечение возникших состояний невротизации и психопатизации в результате напряженной профессиональной деятельности, эмоционального выгорания, стресса и т.д. В любом случае профилактические мероприятия назначаются врачом в индивидуальном порядке после получения результатов мониторинга или медицинских мероприятий.

Таким образом, в результате проведенного анализа была создана информационная технология обеспечения высокой надежности операторской деятельности, учитывающая информационные процессы, протекающие на разных уровнях иерархически организованной эргатической системе, системы человек — машина — окружающая среда, состоящая из информационных блоков оценки надежности операторской деятельности, ее коррекции и мониторинга.

Выводы

Выявленные фундаментальные причины появления ошибочных действий оператора основываются на существовании объективных противоречий между несовершенством имеющихся знаний человека о регулируемых процессах и принятием им решений, а также неполноте правил, регламентирующих действия оператора в особых, необычных ситуациях, ведущих к неправильной интерпретации возникших проблем.

Разработанная иерархическая информационная модель формирования надежности операторской деятельности включает в себя элементы многообразных факторов среды и характеристик организма человека, существенным образом влияющих на формирование надежности операторской деятельности на уровнях человек, человек — машина и человек — машина — окружающая среда, что позволяет более полно оценивать этот параметр, а также разрабатывать адекватные медицинские мероприятия по поддержанию его высокого уровня.

Предложенные информационные модули оценки надежности операторской деятельности основаны на получении интегральных психофизиологических показателей, использовании параметров предельной возможности осуществления деятельности, а также характеристик аллометрической кривой как профиля надежности деятельности и в целом позволяют учитывать в эргатической системе многогранность информационных процессов между действиями человека и функционированием машины.

Разработанные блоки информационной технологии для проведения мониторинга и коррекции надежности операторской деятельности основаны на динамическом отслеживании уровня проявления психофизиологических качеств оператора и состоят из этапов: периодический контроль надежности операторской деятельности, проведение профилактических, тренировочных, превентивных реабилитационных или лечебных процедур, направленных на обеспечение высокой надежности профессиональной деятельности и сохранения работоспособности человека.

Созданная оригинальная парадигма информационного обеспечения высокой надежности операторской деятельности основана на оценке возможностей человека по переработке разной по смыслу и интенсивности информации в широком диапазоне ее предъявления при моделировании операторской деятельности с учетом функционального состояния оператора, что, в свою очередь, позволит сохранить профессиональное здоровье и трудовые ресурсы Украины.

1. Войтенко А.М. Психофизиологический анализ причин ошибочных действий человека-оператора / А.М. Войтенко // Вестник Балтийской педагогической академии. — 2006. — Вып. 69 — С. 49–57.
2. Novak D. Dual-task performance in multimodal human-computer interaction: a psychophysiological perspective / D. Novak, M. Mihelj, M. Munih // *Multimedia Tools and Applications*. — 2012. — Vol. 56, No. 3. — P. 553–567.
3. Himma K.E. The concept of information overload: A preliminary step in understanding the nature of a harmful information-related condition / K.E. Himma // *Ethics and Information Technology*. — 2007. — Vol. 9. — P. 259–272.
4. Psychophysiological Evaluation of Task Complexity and Cognitive Performance in a Human Computer Interface Experiment / M. Mount William, C. Tuček Deborah, A. Abbass Hussein / *Neural Information Processing : Lecture Notes in Computer Science* // 19th Int. Conf., ICONIP 2012, Doha, Qatar, November 12-15, 2012. — 2012. — Vol. 7663. — P. 600–607.
5. Theerasak P. Information overload among professionals in Thailand // *Journal of Information Technology Impact*. — 2010. — Vol. 10, No 3. — P. 171–200.
6. Ахутин В.М. Деятельность А.И. Берга в области бионики и биомедицинской кибернетики / В.М. Ахутин // *Радиоэлектроника и связь*. — 1993. — № 1. — С. 13–16.
7. Акмеология / под ред. Деркача А.А. — М. : РАГС, 2006. — 424с.
8. Надежность и эффективность в технике: справочник. — Т.1. : Методология. Организация. Терминология / Под ред. А.И. Рембезы. — М. : Машиностроение, 1986. — 224 с.
9. Котик М.А. Психология и безопасность / М.А. Котик. — Таллинн : Валгус, 1989. — 448 с.
10. Павлов В.В. Системы человек — машина: проблемы и синтез. — К. : Вища школа, 1987. — 55 с.
11. Зараковский Г.М. Закономерности функционирования эргатических систем. / Г.М. Зараковский, В.В. Павлов. — М. : Радио и связь, 1987. — 232 с.
12. Никифоров Г.С. Надежность профессиональной деятельности / Г.С. Никифоров. — СПб. : Изд-во С.-Петербургского ун-та, 1996. — 172 с.
13. Зазыкин В.Г. Акмеологические проблемы профессионализма / В.Г. Зазыкин, А.П. Чернышев. — М. : НИИВО, 1993. — 134 с.
14. Небылицын В.Д. Надежность работы оператора в сложной системе управления и ее психофизиологические факторы / В.Д. Небылицын // *Психофизиологические исследования индивидуальных различий*. — М. : Наука, 1976. — С. 194–208.
15. Нерсесян Л.С. Инженерная психология и проблема надежности машиниста. / Л.С. Нерсесян, О.А. Конопкин. — М., 1978. — 240 с.
16. Толочек В.А. Современная психология труда : учебное пособие / В.А. Толочек / 2-е изд. — СПб. : Питер, 2008. 432 с.
17. Кальниш В.В. Информационные модели процесса формирования надежной операторской деятельности / В.В. Кальниш // *Клиническая информатика и телемедицина*. — 2009. — № 6. — С. 18–25.
18. Age Characteristics of the Speed of Central Information Processing In Persons with Different Levels of Functional Mobility of Nervous Processes / M. V. Makarenko, V. S. Lizogub, T. V. Kozhemyako, N.F. Chernenko // *Int. Journal of Physiology and Pathophysiology*. — 2011. — Vol. 2, No 4. — P. 335–341.

19. Дикая Л.Г. Проблемы современной психологии труда / Л.Г. Дикая // Психологический журнал. — 1992. — № 3. — С. 24–41.
20. Kalnysh V.V., Shvets A.V. Effect of intense 24-hour shift work on reliability of operators' activity / V.V. Kalnysh, A.V. Shvets // Human Physiology. — 2012. — Vol. 38, No 3. — P. 294–302.
21. Пушкин В.Т. Проблема надежности. — М. : Наука, 1971. — 189 с.
22. Швець А.В., Кальниш В.В. Особливості впливу різних психофізіологічних станів на надійність операторської діяльності / А.В. Швець, В.В. Кальниш // Військова медицина України. — 2009. — № 1. — С. 84–91.
23. Nagel E., Gödel's Proof / Ernest Nagel, Newman James Roy / edited with a new introduction by Douglas R. Hofstadter. — NYU Press; Revised edition, 2008. — 160 p.
24. Гельфанд И.М. О тактиках управления сложными системами в связи с физиологией // Биологические аспекты кибернетики / И.М. Гельфанд, В.С. Гурфинкель, М.Л. Цетлин — М., 1962. — С. 66–73.
25. Кальниш В.В. Гендерні особливості надійності операторської діяльності / В.В. Кальниш, А.В. Швець, Й.Р. Левіт // Журнал Академії медичних наук України. — 2009. — Т. 15, № 4. — С. 755–768.
26. Changxu Wu. Queuing Network Modeling of a Real-Time Psychophysiological Index of Mental Workload—P300 in Event-Related Potential (ERP) / Changxu Wu, Yili Liu, C.M. Quinn-Walsh // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part A. Systems and Humans. — 2008. — Vol. 38, No 5. — P. 1068–1084.
27. Єна Т.А. Гігієнічна і психофізіологічна оцінка професійної діяльності диспетчерів енергосистем / Т.А. Єна // Український журнал з проблем медицини праці. — 2008. — Т. 13, № 1. — С.13–19.
28. Єна Т.А., Кальниш В.В. Професійно важливі якості диспетчерів енергосистем// Український журнал з проблем медицини праці / Т.А. Єна, В.В. Кальниш — 2010. — № 4(24). — С. 11–20.
29. Особенности классификации состояния человека-оператора средствами нечеткой логики / В.В. Кальниш, А.Г. Фирсов, А.В. Швець, А.И. Ещенко // Кибернетика и вычисл. техника. — 2011. — Вып. 166. — С. 55–67.
30. Кальниш В.В., Швець А.В. Особливості оцінки якості операторської діяльності з використанням профілю надійності / В.В. Кальниш, А.В. Швець // Клінічна інформатика і телемедицина. — 2013. — Т. 9. — Вип. 10. — С. 123–130.

Получено 15.05.2014

Медицинская и биологическая кибернетика

УДК 519.6+612

A FORMAL ANALYSIS OF MECHANISMS INCREASING ARTERIAL PRESSURE

Grygoryan R.D.

Institute of Software Systems of National Academy of Sciences of Ukraine

Предложено расширенное представление о механизмах регуляции среднего артериального давления в норме и при артериальной гипертонии. У позвоночных (в частности, у человека) есть многомасштабная энергетическая мегасистема, ведущая борьбу против продолжительной нехватки АТФ в клетках. Механизмы, балансирующие скорости производства и расхода АТФ в каждой клетке, находятся во взаимосвязи с механизмами и вегетативными системами организменного масштаба. Развитие артериальной гипертонии скорее является компенсаторной реакцией на нехватку энергии, чем болезнью.

Ключевые слова: артериальная гипертония, энергетика, физиология кровообращения, модели.

Запропоновано розширене уявлення про механізми регуляції середнього артеріального тиску в нормі та при артеріальній гіпертонії. У хребетних (зокрема, у людини) є багатомасштабна енергетична мегасистема, яка веде боротьбу проти тривалої нестачі АТФ в клітинах. Механізми, які балансують швидкості продукування та використання АТФ в кожній клітині, знаходяться у зв'язку з механізмами та вегетативними системами організму. Розвиток артеріальної гіпертонії скоріше є компенсаторною реакцією на нестачу енергії, ніж хворобою.

Ключові слова: артеріальна гіпертонія, енергетика, фізіологія кровообігу, моделі.

INTRODUCTION

Arterial hypertension (AH) is a multi-factor disease mostly developing gradually [1, 2]. About 30% of adults are affected by AH. However, its etiology is clear only for 5% of diseased people [3]. AH eventually leads to associated serious pathologies (heart failure, brain hemorrhagic stroke, renal diseases) [2–5]. In fact, therapies of AH are often aimed rather to mitigate its symptoms than really eliminate the disease [3]. Despite advanced drugs and cure, the number of diseased people is not reducing [3]. Experts recognize that there are still some cases of essential AH uncovered by its theories [2, 5, 6]. This disappointment gives a reason to suspect that our knowledge of physiological mechanisms responsible for a homeostasis of arterial pressure (AP) contains serious gaps. Naturally, mathematical models of AP's physiological control could not be free of these gaps. To come to most comprehensive models, we need to extend our understanding of a role playing by cardiovascular system (CVS) in human organism. The extended view of CVS must include both CVS's autonomous control mechanisms and

conditions in which functions of these mechanisms become modulated via factors born out of CVS.

This article has two **goals**. The first one — theoretical goal is to provide special formalized analysis determining both mechanisms of normal AP and causes of its changes. The second one — medical goal is to facilitate a search for cardinal curing of AH.

BASIC INFORMATION

Most theories of AP's homeostasis silently assume that a stabilization of mean arterial pressure (MAP) is the goal of control mechanisms [4–6]. In frame of this concept, alterations of MAP are interpreted as undesirable aberrations of CVS. In particular, AH is considered as a disease that should be cured in ways leading to normalization of MAP (or its end-systolic and end-diastolic peaks).

A cardinal new view of AP's role in organism is proposed in recent general theory of reversible adaptation [7–9]. In fact, the conceptual leap concerns both AP's role and fundamentals of organs integration for providing of vegetative functions. To mostly relief represent the new concept, it is useful to compare it with a traditional concept.

In traditional physiology, every organ is considered to be an upper-scale structure that has its specialized function(s) and autonomous control systems. Under environmental violations, these organs and systems generally provide organism's homeostasis. In contrast, the energy concept showed that a group of upper-scale organs, direct or indirectly involved in modulation of cell's mean rate of ATP-production, form an exclusive functional system aimed to provide of long-term energy balance (EB) in every specialized cell of the organism. This functional system was called an energy megasystem (EMS) because of its enormously large size and complexity. It is important to remember that the CVS is one of constituent systems of EMS thus a functional activity of CVS is reciprocally associated with the activity of remained structures of EMS.

In human cells, ATP is produced both via anaerobe glycolysis in cytoplasm and via oxygenation of pyruvic acid in mitochondria. The pyruvate is a common chemical output of intracellular transformations of carbohydrates, fatty acids, fats, and proteins. Normally, mitochondria are main producers of ATP. As the aerobic cell does not store a large amount of ATP-molecules, their mean mitochondrial synthesis rate (v_s) is tightly associated with a mean rate (v_d) of dissociation of ATP. Although intracellular mechanisms balancing v_s with v_d are known, because of limited efficiency, under chronic increase of v_d , these mechanisms do not provide long-term EB.

The energy view on human physiology revealed several hidden internal relationships of organs and systems. Most of these relationships was evolutionary saved because they accelerate cells' fight against chronic energy deficit [7]. Indeed, the long-term lack of ATP suppresses most cellular activities including cell's and entire organism's reactivity to dangerous environmental challenges. So, in conditions of unstable environment, those multicellular organisms that accelerated mitochondrial enlargement in inhibited cells, had more chances to survive. It is

reasonable to state that such a type of organism is the energetically most advanced.

In human cells, molecules of ATP are main consumables. Both the metabolism and the reactivity of every cell are vulnerable to deficit of ATP. A lack of energy suppresses or interrupts several biochemical transformations and affects cellular reactivity to extracellular signals. So, even under rest conditions, a functional integrity of entire organism or its physiological systems critically depends upon compensatory incomes of consumables necessary for a synthesis of ATP.

Mitochondrial total surface is main long-term determiner of v_s [7]. Under continuous situation of $v_s < v_{l_d}$, eventually an energy deficit will appear. So, cytoplasm concentrations of various interim chemicals eventually elevate. Some of these chemicals (e.g., hypoxia inducible factors [2]) increase v_s and activate mechanisms of proliferation/hypertrophy of mitochondrion. Theoretically, this negative feedback should work until a new rate of ATP production ($v_{l_s} \geq v_{l_d}$) eliminates the deficit of energy. In real conditions, the mitochondrial up-build requires appropriate material incomes.

The aerobic cell cannot store a large numbers of ATP molecules, thus the increased v_s automatically decreases the number of consumables (carbohydrates and oxygen). There are multiple mechanisms compensating this lack of consumables. Under local (regional) deficit of either oxygen or glucose, local vasodilatation (provided by chemicals leaved suffering cells) does increase blood flow and compensate the moderate lack of incomes. However, in case of a large affected region, the regional vasodilatation drops MAP and decreases blood flows. There are several ways to overcome such energy problems. An increase of MAP is a way leading to elimination of a severe deficit of ATP only in case of sufficient blood concentrations of glucose and oxygen. In case of low glucose, special low molecular chemicals produced by energy suffered cells activate mechanisms of glucose neogenesis from liver glycogen.

There are three subways for compensating of low blood oxygen. A mobilization of blood from its depots is the first and most rapid way but this way has very limited resource. An increase of lung ventilation is the second rapid way supporting blood erythrocytes' oxygenation. At last, an increase of a rate of erythropoiesis is the main but inertial way capable to provide additional erythrocytes for transporting of oxygen toward cells. These mechanisms all together prompt every cell to overcome its energy problems if only the organism possesses sufficient internal material resources. In versus case, these materials have to be taken from outside therefore, those behaviors that are integrated in food search and assimilation are also involved in EMS.

This general view of organism's mechanisms, evolutionary saved for optimal fighting of energy deficit in cells, is the basis for comprehending of causes and mechanisms for both fluctuations and long-term shifts of MAP. To facilitate this comprehension and to create a basis for advanced mathematical models, let us formalize current physiological knowledge concerning neural-hormonal control of MAP.

A FORMAL DESCRIPTION OF MECHANISMS REGULATING MAP

Assume $P_A(t)$ and $P_V(t)$ denote momentum values of AP and central venous pressure appropriately. In practice, physicians use AP's two characteristics: end-systolic and end-diastolic peaks. But these extreme values of $P_A(t)$ depend on measurement site on arterial tree. Besides, for a given time τ , a mean blood flow between every two vascular segments is determined by their mean pressure gradients. Usually, τ represents the duration of a cardiac cycle. To calculate cardiac output $Q(\tau)$, one needs mean value of total peripheral resistance $R_T(\tau)$, as well as mean values $\bar{P}_A(t)$, $\bar{P}_V(t)$ of $P_A(t)$, and $P_V(t)$ respectively.

$$\bar{P}_A(t) = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} P_A(t) dt; \quad \bar{P}_V(t) = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} P_V(t) dt; \quad Q(\tau) = (\bar{P}_A(t) - \bar{P}_V(t)) / R_T(\tau).$$

To clarify common and specific mechanisms fluctuating human hemodynamic characteristics, as well as to determine distinguish signs of these mechanisms in comparison with mechanisms shifting both $\bar{P}_A(t)$ and $P_A(t)$, we must remember that the CVS is an open non-stationary system. Fluctuations of $P_A(t)$ and $\bar{P}_A(t)$ in physiological conditions suggest that characteristics of CVS are time-variables. Energy-based modulators of $\bar{P}_A(t)$ are not the exclusive external influences on CVS. Hemodynamic effects of modulators can be realized via changes of limited number of CVS's characteristics: $Q(t)$, vascular tone $T_v(t)$, blood volume $V_s(t)$. So, every controller of human hemodynamics should have an access at least to one of parameters that determine $Q(t)$, $T_v(t)$, and $V_s(t)$.

As $\bar{P}_A(t)$ is in the focus of our analysis, it is worth to stress that $\bar{P}_A(t)$ is most sensitive to variations of $V_s(t)$. Traditionally, kidneys are assumed to be main regulator of $V_s(t)$. Indeed, under dropping of $\bar{P}_A(t)$, cells of juxtaglomerular complex release renin that go to circulate. In liver cells, renin causes a release of *angiotensin I* (non-active protein). After a lung circulation, the *angiotensin I* is transforming into an *angiotensin II* which is a vasoconstrictor increasing $\bar{P}_A(t)$. Besides, *angiotensin II* compels special cells to produce a hormone *aldosterone*. In renal tubules, *aldosterone* increases a fluid reabsorption rate. Totally, these endogenous chemical agents increase $\bar{P}_A(t)$ via increasing of both $V_s(t)$ and $Q(t)$ [5, 7].

In frame of this concept, there is assumed to be none interim alteration between the decrease of $\bar{P}_A(t)$ and decrease of filtration rate in juxtaglomerular cells thus, the rennin-angiotensin system is considered to be a regulator of $V_s(t)$. This concept could be true in case of absolutely passive filtration in renal capsules. In case the filtration is at least a partially active process provided by ATP, there will be a time delay between a drop of pressure in renal arterioles and release of renin. Indirectly, this supposes that a dependence of renin from $\bar{P}_A(t)$ is rather

associative than causal. This qualification, seeming to be secondary, is crucial in frame of energy concept of arterial pressure. The fact that currently nine versions of angiotensines (with unclear contributions in hemodynamic shifts) are discovered gives additional reason for revising of traditional view on renal control of $V_s(t)$ and $\bar{P}_A(t)$ [5, 6]. It was supposed that renin or its functional analogues are universal indicators of energy lack in cells of different specialization [8].

So, practically all our specialized cells take part in determining of CVS's state and a value of $\bar{P}_A(t)$. This is the essence of novel energy concept of AH's etiology [7, 8]. A brief description of this concept given below is to facilitate understanding of main intracellular and upper-scales mechanisms responsible for both fluctuations and long-term shifts of $\bar{P}_A(t)$.

Under given central venous pressure, $Q(t)$ depends on heart rate $F(t)$ an ejection fraction (EF). Under constant total peripheral resistance, EF can be characterized by a coefficient $k(t)$ calculated as a quotient of stroke volume of ventricle to its end-diastolic volume [7].

The integral vascular tone $T_v(t)$ reflects values of arterial and venous unstressed volumes $U_A(t)$, $U_V(t)$ and volumetric rigidities $D_A(t)$, $D_V(t)$ respectively. In every vascular compartment, its vascular resistance $R_v(t)$ depends on $V(t)$, $U(t)$, and $D(t)$ [8]. An exact formula connecting these characteristics of CVS with $P_a(t)$ hardly can be identified but a large amount of successive mathematical models are based on approximations like

$$P_A(t) \approx \Psi(V_s(t), U_s(t), T_v(t), R_v(t), F(t), k(t)). \quad (1)$$

For convenience, CVS's characteristics included in Ψ – function in (1), further are denoted x_i .

$$P_A(t) \approx \Psi(x_i(t)). \quad (2)$$

Assume $x_i(0)$ is a value of every variable x_i under unstressed regulators. In every other physiological state, and for every t , variables $x_i(t)$ represent regulator alterations of the $x_i(0)$ on $\Delta x_i(t)$. Every $\Delta x_i(t)$ has its extreme values, so $|\Delta x_i(t)| \leq x_i^{Ext}$. Within this interval, the value of $\Delta x_i(t)$ can be calculated as an algebraic sum of effects, caused by $j = \overline{1, m}$ physiochemical influences. For a part of such influences, their sources are known (baroreflexor, chemoreflexor influences, descending nervous influences of brain upper structures, and a variety of humoral agents). Another group of influences (e.g., temperature, metabolic, exogenous activators or inhibitors) can have mainly local effects (e.g., modulating only the basic rate of heart pacemakers). A formal description of these opportunities looks as:

$$x_i(t) = \begin{cases} x_i(0) \pm \Delta x_i(t), & |x_i(t)| \leq x_i^{Ext}, \text{ where } \Delta x_i(t) = \sum_{r=1}^m \Delta x_{ir}(t), \\ x_i^{Ext}, & |x_i(t)| > x_i^{Ext} \end{cases} \quad (3)$$

where

$$\Delta x_{ir}(t) = \begin{cases} 0, & Y_{ir}(t) \leq y_{ir} \\ a_{ir}(Y_{ir}(t) - y_{ir}) + b_{ie}, & y_{ir} < Y_{ir}(t) < Y_{ir}^s \\ \Delta x_{ir}^s, & Y_{ir}(t) \geq Y_{ir}^s \end{cases} \quad (4)$$

A piecewise linear relations (4) commonly represent characteristics of specialized receptors. The formula (4) takes into account that every such receptor is not active until its activity threshold y_{ir} has been overcome. The formula (4) also supposes that every receptor has its saturation level Y_{ir}^s . Within these extreme values $y_{ir} < Y_{ir}(t) < Y_{ir}^s$, the receptor activity $Y_{ir}(t)$ is proportional to an over-threshold value of real biological variable (e.g., blood transmural pressure or chemical parameters). Certainly, this linear approximation does not cover the entire diapason of receptors' activity. Nevertheless, the reduced formulas (3) and (4) are capable to model main cardiovascular reflector responses Δx_{ir} to internal/external challenges of moderate values characteristic for physiological conditions. For every receptor, the sensitivity coefficient a_{ir} is considered to be constant for the entire diapason of receptor function. It is assumed that the summands b_{ie} are not zero only for those x_i that surely are under additional influences.

Formalizations (3) and (4) cover every variable of CVS. However, the multiple control of the hemodynamics has several nuances that should be specially commented. To accentuate some of these nuances, it is useful to compare the control of the heart pump function with the control of regional vascular tones. Let us look inside the control of $F(t)$.

It is known that under normal physiological conditions, the rate of right atrium's pacemakers is the main determiner of $F(t)$. From the other hand, the pacemakers are sensitive to changes of both blood temperature (T^o) and blood chemical state (z). So, the basic rate (f_a) of right atrium's pacemakers is a function of at least two independent variables: $f_a(T^o, z)$. Under $z = const$, the function $f_a(T^o, z)$ is practically linear within $33^\circ\text{C} \leq T^o \leq 41^\circ\text{C}$. Under $T^o = const$, variations of z could either increase f_a or decrease it.

Descending nervous modulations of $F(t)$ can reach the right atrium's pacemakers via appropriate nervous fibers of cardiac sympathetic or parasympathetic nerves. The sympathetic fibers cause positive chronotropic effect while the parasympathetic pathways have negative chronotropic effect. Denote these effects ΔF_s and ΔF_v , respectively. Then, descending modulator effects

caused both by brain supra-bulbar structures and by main hormonal modulators (adrenalin, noradrenalin, and acetylcholine) can be formalized as

$$F(t) = f_a(T^o, z) + \Delta F_s - \Delta F_v. \quad (5)$$

Note that the formula (5) is indifferent to nature of modulators. In practice, a differential diagnosis of AH and its cure require information about investment of every modulator in a measured alterations of $F(t)$. This last sentence is explained below.

Assume, an elevation of $P_A(t)$ is caused by an increase of $Q(t)$. The gain of $Q(t)$ is possible due to three independent alterations: 1) via increase of $\bar{P}_V(t)$; 2) via increase of $F(t)$; 3) via increase of heart contractility. Suppose $\bar{P}_V(t) = const$. Then nervous alterations either increase the frequency of sympathetic impulses or decrease the frequency of parasympathetic impulses in the respective descending heart nervous branches. So, the total effect is in a gain of $Q(t)$. In addition, several hormonal agents are also capable to gain of $Q(t)$. Indisputable, the therapy of AH should be based on differentiation of these mechanisms. But even possessing of reliable methods for such differentiation, there is still one more important problem: it is necessary to clarify the primary cause of alterations in every regulator mechanism.

The main effect of reflexes activated because of ascending impulses born in cardiac or arterial mechanoreceptors is to damp cyclic violations of $P_A(t)$ [2, 5, 7]. Chemoreceptor reflexes normally are aimed to increase MAP, as well as to intensify lung ventilation. Two these alterations commonly provide the due composition of the arterial blood [5]. As to relative roles of CVS's nervous and humoral control mechanisms, researchers agreed only if the discussion concerns the speed of these mechanisms [2]. Analogically, there is no consensus concerning roles of a variety of chemicals modulating heart pump function and /or vascular tone [5]. The last sentence also concerns local effects of low molecular metabolites (e.g., H^+ , OH^- , CO , CO_2 , NO , SO_2) [2, 3, 12]. So, this ambiguity of thoughts formed the conceptual relief on which the energy concept of arterial pressure (ECAP) explained main mechanisms of cardiovascular variability had appeared [8].

Suppose in (2) some state of arterial pressure $P_A(t) = P_A^*(t)$ is already chosen to be the basic state. In accordance with common concept of homeostasis, the value of $P_A^*(t)$ is often close to a special but virtual value $P_{AN}^*(t)$ also called as the normal value of $P_A(t)$ under rest. However $P_{AN}^*(t)$ is not argued physiologically. $P_{AN}^*(t)$ is statistically calculated as the mean value of $P_A(t)$ in a population of practically healthy people under rest. Thus, $P_{AN}^*(t)$ does not mandatorily represent the normal arterial pressure for an individual. To overcome this conceptual disparity, recently a concept of individual physiological norm is proposed [9]. According to the new interpretation, the individual physiological

norm is a synonymous to organism-scale energy balance. But the energy production/consumption rates can be balanced on different levels of ATP-production. This means that instead of an exclusive state of virtual homeostasis, every organism can have a lot of normal states. Therefore, multiple combinations of $x_i(t)$ are capable to provide the values of $P_A^*(t)$.

In the dimension of state parameters $x_i(t)$ of CVS, two states of CVS could be determined of different $x_i(t)$. Although the inequality $x_i(t) \neq x_i(0)$ appears in both states, mechanisms responsible for these inequalities are not the same. Indeed, in one case, the situation of $x_{1i}(t) \neq x_i(0)$ appears because of stressed regulators while in opposite case of $x_{2i}(t) \neq x_i(0)$ none regulator of CVS is stressed.

Normally, regulator shifts of Δx_i are reversible and do not continue for a long-time. Besides, such shifts do not cause ultrastructural re-build. However, there is another type of alterations covering both effectors (myocardium, vascular smooth muscles) and of regulator mechanisms' characteristics (activation thresholds, parameters of the sensitivity and saturation of receptors). Mechanisms responsible for transitory alterations $x_{1i}(t) \neq x_i(0)$ are known. Moreover, physiologists and physicians are sure that the alterations have compensatory character. Nevertheless, both initiator and realizing mechanisms of this goal are still unknown yet. In frame of the problem of AH, this physiological uncertainty does origin medical problems.

As a rule, most patients addressing for a cure already have signs of a developed pathology. The multiple regulators of hemodynamics, possible individual ontogenetic variations of every regulator are factors complicating both a correct diagnosis of AH and its due cure [3, 13]. Despite these initial problems, under AH's extreme cases, the doctor must provide an appropriate cure of AH.

Currently, the cure is aimed to return important characteristics of CVS to their so-called normal values thus the cure is mostly targeted to elimination of symptoms [3]. Is such a cure correct? The question is not rhetorical because the so-called normalization of AH does not take into account the real complexity of EMS and the multiplicity of individual adaptations [7]. The current medical technologies are not capable to effectively fight AH via drugs inactivating initial shifts. Thus AH's cure displays only transitory effects that are mainly disappearing soon after the intake of drugs is stopped [3, 5]. From the platform of EMS, such transitory results evidently show that the cure do not act against new stabile values of $x_{2i}(t)$. In other words, the palliative effect acts only at level of regulators forming $\Delta x_i(t)$, but there is no structural returning to $x_i(0)$.

So, all we know about physiology of CVS concerns its own reflexes aimed to control AP. The traditional hemodynamic approximation does not point out determinants of MAP. A search for deep mechanisms indirectly modulating AP, and likely being associated with functions of other physiological sub-units, could bring us to an extended concept of AP. During this search, the initial quest is: why the organism needs AP in general?

According to [6, 7], normally, current level of AP should not be less than a pressure providing blood flows sufficient for production of due amount of ATP in

cells. In statics, every cell tries to control its mitochondria for reaching an optimal summary surface sufficient to balance v_s with v_d . This balance does not depend on physiochemical fluctuations in local intercellular environment. In fact, such a multi-parametric optimization suggests that MAP does properly vary depending on blood chemical composition. As this composition is resulted of efforts developed in different physiological sub-systems of EMS, the level of MAP has to be inversely proportional to activities of mechanisms that regulate blood glucose, number of erythrocytes, lung ventilation, as well as a concerted function of the digestive system. This branched system supposes a huge number of situations satisfying energy needs of cells.

There is one more aspect that should have been analyzed. This aspect concerns correct understanding of causes transforming the physiological control of AP to its pathological shifts. Last several years, local rennin-angiotensin systems [6, 10] and AMP-activated protein kinase [11–16] are in the focus of investigations. At the moment, experts proposed a lot of hypotheses concerning roles of tissue factors in control of cardiovascular activity, but practically every hypothesis silently assumes that there should be some general control of AP. In this paper, another idea based on casual mutations is provided.

The concept of EMS [7] assumed that the upper-scales sub-units of EMS had been evolutionary saved because they accelerate the fight of cells against energy imbalance. An indirect effect of this system is that alterations (geometric sizes, functional) of sub-units of EMS will be synchronized. Although clinicians had accumulated a lot of evidences that under certain diseases, a hypertrophy of some organs (liver, kidneys, heart, and glandules) happened, only the energy concept explains why and how these alterations correlate.

The evolutionary view of complex regulator ensembles suggests that our organs and systems are not mandatorily optimal as one could suppose. Although the anatomy, genetics, and biochemistry provided of many arguments for this assertion, until recently, analogical physiological arguments were absent. Namely, the parallelism of efforts developed by a huge number of cells (fighting for common and scarce resources) is the best argumentation of a thought that the long-term optimum and the acute-optimum cannot be provided simultaneously [7]. The upper-scales regulators become activated to create a due productiveness of cell-scale energy producers – mitochondria. So, the upper-scales regulators are under chemicals produced by every cell. Perhaps, intravascular endothelial cells, representing organism's biggest producer of hormones, play the main role in modulation of MAP-level. However, the energy concept of AP ensures that the long-term level of MAP reflects total contribution (including opposite efforts) of practically all cells. Therefore, an advanced cure of pathological shifts of AP requires a creation of medical technologies based on the concept of individual physiological norm [9].

CONCLUSIONS

The CVS is only a part of EMS that counteracts against lack of ATP in cells. EMS also includes regulators of lung ventilation, of erythropoiesis, of blood glucose, and mechanisms regulating the biogenesis of mitochondria. The AP's

responsibility concerns only transporting of chemical ingredients to and from cells. The level of AP is reciprocally associated with the activity of remained functional blocks of EMS thus their low activity can be compensated via increasing of AP.

A transitory increase of AP supposes one of following scenarios: a) EMS's non-hemodynamic reactions are delayed; b) the lack of ATP disappeared due to spontaneously decreased rate of ATP-consumption. A steady growth of AP indicates that assistant blocks of EMS cannot provide the adequate power.

A hypotensive cure of AH is advisable only under real risk of a haemorrhage. In versus cases, the organism is searching for providing of cell energy balance using non-cardiovascular mechanisms.

A healthy person can have AP essentially different of so-called normal AP. Under blocking of mechanisms that increase AP, the counteracting mechanisms use alternative ways for fighting the energy lack. In particular, persons having more erythrocytes and/or more effective mitochondria do have lower values of AP.

It is necessary to develop medical technologies capable to provide both a differential diagnostics of main forms of AH and their elimination on initial stages of development.

1. Ferrari A.U. Modifications of the cardiovascular system with aging / A.U. Ferrari // *Am. J. Geriatr. Cardiol.* — 2002. — Vol. 11. — № 1. — P. 30–33.
2. Rhian T.M. New insights into mechanisms of hypertension / T.M. Rhian // *Current Opinion in Nephrology & Hypertension.* — 2012. — 21. — Issue 2. — P.119–121.
3. Chobanian A.V. The hypertension paradox: more uncontrolled disease despite improved therapy / A.V. Chobanian // *N. Engl. J. Med.* — 2009. — **361**. — P. 878–887.
4. Kumar R., Thomas C.M., Yong Q.C., Chen W., Baker K.M. The intracrine renin-angiotensin system // *Clin. Sci. (Lond).* — 2012. — **123**. — P. 273–284.
5. Cowley A.W. Jr. Renal medullary oxidative stress, pressure-natriuresis, and hypertension / A.W. Cowley // *Hypertension.* — 2008. — **52**. — P. 777–786.
6. Kirchhiiem H.R. Our fragmentary knowledge of the regulatory functions of ANG II "fragments": are we beginning to see the light? / H.R. Kirchhiiem // *American journal of physiology. Regulatory, integrative and comparative physiology* 2003, **285**. — P. 937–938.
7. Grygoryan R.D. The Energy basis of reversible adaptation / R.D. Grygoryan. — N.Y. : Nova Science. — 2012. — 254 p.
8. Григорян Р.Д. Энергетическая концепция артериального давления / Р.Д. Григорян // *Доповіди нац. акад. наук України.* — 2011. — № 7. — С.148–155.
9. Григорян Р.Д. Индивидуальная физиологическая норма: концепция и проблемы / Р.Д. Григорян // *Доповіди нац. акад. наук України.* — 2013. — № 8. — С.156–162.
10. Tissue renin-angiotensin systems: a unifying hypothesis of metabolic disease / J. Skov, F. Persson, J. Frøkiær, J.S. Christiansen // *Front Endocrinol (Lausanne).* — 2014. — Vol. 28. — P.5–23.
11. Hardie DG. AMPK: a key regulator of energy balance in the single cell and the whole organism // *Int J Obes (Lond).* 2008. — **32**, Suppl 4. — P. 7–12.
12. Lawrence H.Y. AMP-Activated protein kinase conducts the ischemic stress response orchestra // *Circulation.* — 2008. — **117**. — P.832–840.
13. Lee W.J., Kim M., Park H.S., Kim H.S., Jeon M.J., Oh K.S., Koh E.H., Won J.C., Kim M.S., Oh G.T., Yoon M., Lee K.U., Park J.Y. AMP-activated protein kinase signaling stimulates VEGF expression and angiogenesis in skeletal muscle // *Circ. Res.* — 2005. — **96**. — P. 838–846.
14. Lee W.J., Kim M., Park H.S. et al. AMPK activation increases fatty acid oxidation in skeletal muscle by activating PPAR alpha and PGC-1 // *Biochem. Biophys. Res. Commun.* — 2006. — **340**. — P. 291–295.

15. Zong H., Ren J.M., Young L.H., Pypaert M., Mu J., Birnbaum M.J., Shulman G.I. AMP kinase is required for mitochondrial biogenesis in skeletal muscle in response to chronic energy deprivation // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. — 2002. — **99**. — P. 15983–15987.
16. Kohlstedt K., Trouvain C., Boettger T. et al. AMP-activated protein kinase regulates endothelial cell angiotensin-converting enzyme expression via p53 and the post-transcriptional regulation of microRNA-143/145 // Circ. Res. — 2013. — **1121**. — P. 150–1158.

Получено 29.05.2014

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕДИЦИНСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ, ОСНОВАННОЙ НА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМ АНАЛИЗЕ ДАННЫХ

Г.В. Кнышов¹, А.В. Руденко¹, Е.А. Настенко^{1,2}, А.В. Яковенко²,
С.О. Сиромеха¹, С.С. Галич¹

¹Национальный институт сердечно-сосудистой хирургии им. Н.М. Амосова
НАМН Украины

²Национальный технический университет Украины «Киевский
политехнический институт»

Описаны структура и этапы проектирования информационной системы поддержки принятия врачебных решений при ведении больных с ишемической болезнью сердца. В основе информационной системы лежит интеллектуальный анализ данных, представленный математическими моделями прогноза развития острой сердечной недостаточности, что позволяет на дооперационном этапе выявить риск развития осложнения в раннем послеоперационном периоде. Разработанная информационная технология позволяет не только выявлять риск развития осложнения, но и принимать решения с целью коррекции лечебного процесса.

Ключевые слова: медицинская информационная система, принятие решений, интеллектуальный анализ данных, коррекция лечебного процесса.

Описано структуру і етапи проектування інформаційної системи підтримки прийняття лікарських рішень при веденні хворих з ішемічною хворобою серця. В основі інформаційної системи лежить інтелектуальний аналіз даних, наданий математичними моделями прогнозу розвитку гострої серцевої недостатності, що дозволяє на передопераційному етапі виявити ризик розвитку ускладнення в ранньому післяопераційному періоді. Розроблена інформаційна технологія дозволяє не лише виявляти ризик розвитку ускладнення, а й приймати рішення з метою корекції лікувального процесу.

Ключові слова: медична інформаційна система, прийняття рішень, інтелектуальний аналіз даних, корекція лікувального процесу.

ВВЕДЕНИЕ

Современные медицинские информационные системы (МИС) обеспечивают сбор, регистрацию, структурирование, документирование данных, обмен, хранение и поиск информации, а также поддержку принятия решений (ППР) по оказанию медицинской помощи пациентам. Однако использование накопленной информации для снижения частоты осложнений и совершенствования лечебного процесса все еще является далекой от окончательного решения задачей.

Кроме того, часто в массивах данных содержатся недостающие для принятия успешных решений скрытые знания, получить которые можно с помощью современных направлений информационных технологий (ИТ) и методов интеллектуального анализа данных (ИАД).

Не менее важным остается формализация слабоструктурированных и

неструктурированных задач. Это позволяет создавать модели прогноза развития осложнений, анализировать структуры факторов, приводящих к осложнениям, выявлять пациентов повышенного риска, а также осуществлять динамическую корректировку лечебного процесса с целью минимизации риска развития и тяжести осложнений и снижения числа повторных обращений.

ИАД-ориентированные МИС требуют использования современных подходов и методов анализа данных. Особую актуальность приобретают современные методы многомерного статистического анализа, с помощью которых можно установить характер и структуру взаимосвязей между признаками изучаемого объекта [1].

Целью данной работы было обоснование необходимости и представление этапов проектирования информационной системы, основанной на ИАД на примере прогноза риска развития острой сердечной недостаточности (ОСН), в раннем послеоперационном периоде.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения поставленной цели был проведен анализ результатов хирургического лечения 4 809 пациентов с ишемической болезнью сердца (ИБС), которым было выполнено аорто-коронарное шунтирование (АКШ) в 2008–2012 гг. За исследуемый период было выполнено 3 683 операции АКШ на работающем сердце и 1 126 операций с переходом на искусственное кровообращение (ИК) (72 — с экстренным и 1 054 — с плановым переходом на ИК). Средний возраст пациентов составлял 59 ± 9 лет. Соотношение мужчин и женщин составляло 85,2 % и 14,8 % (4 096 и 713 соответственно). У 9,3 % (223) пациентов развилась ОСН в раннем послеоперационном периоде.

Все вмешательства выполнены в Государственном учреждении «Национальный институт сердечно-сосудистой хирургии им. Н.М. Амосова» НАМН Украины.

Анализ данных и выявление скрытых закономерностей проводились с использованием различных математико-статистических и энтропийных методов. Для выявления факторов риска были использованы методы бинарной логистической регрессии (БЛР) [2] и дискриминантного анализа (ДА) [3], а для нахождения взаимосвязей между признаками, представлялось перспективным применение метода снижения факторной размерности — Multifactor Dimensionality Reduction MDR [4].

Далее был проведен сопоставительный анализ факторов, выявленных каждым из методов [5] и для практического использования выбран наиболее эффективный метод.

В процессе проектирования и разработки МИС, определяя основные требования к системе, была построена функциональная модель в среде IBM Rational Rose [8]. Моделирование бизнес-процессов осуществлялось с использованием стандарта IDEF0 в среде BPwin [9]. В соответствии с установленными бизнес-понятиями и бизнес-событиями предметной области осуществлено проектирование БД в среде Microsoft SQL Server.

Для программной реализации системы применялась интегрированная среда разработки MS Visual Studio.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для достижения успеха в принятии решения и ИАД необходимо иметь четкое представление о цели анализа, собрать релевантные данные, выбрать адекватные методы анализа и проверить предпосылки их применения; выбрать программно-технологические и математические средства, реализующие эти методы; выполнить анализ и принять решение об использовании результатов.

Объектом исследований была МИС для прогноза риска развития осложнений, на примере ОСН и ППР, которая обеспечивает следующие функции:

- возможность осуществления поиска пациента в базе данных (БД);
- ввод и сопровождение истории болезни поступившего пациента;
- прогноз развития осложнений;
- построение моделей динамики факторов, необходимых врачу для принятия решений;
- составление отчета по необходимым для врача критериям;
- сохранение полученных результатов в БД системы.

Определяя основные требования к МИС ППР, было проанализировано ее функциональное назначение и была построена диаграмма вариантов использования (рис. 1).

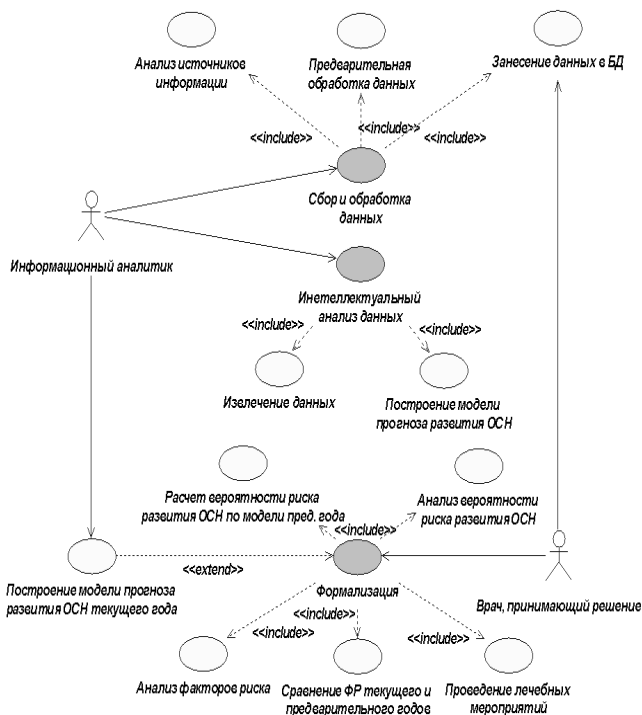


Рис. 1. Диаграмма вариантов использования МИС ППР: БД — база данных; ОСН — острая сердечная недостаточность; ФР — факторы риска

Исходя из функционального назначения, структура МИС ППР включает три блока, которые отвечают за сбор и накопление данных, ИАД и формализацию результатов (рис. 2).

Модуль базы данных (БД) позволяет структурировать и хранить информацию. Блок ППР, построенный на основе ИАД, обеспечивает прогноз риска развития осложнений и предоставляет информацию, необходимую для коррекции лечебного процесса. Формы пользовательских приложений дают возможность вводить, корректировать и анализировать данные по пациенту, рассчитывать риск развития осложнений в раннем послеоперационном периоде и формировать статистические отчеты.

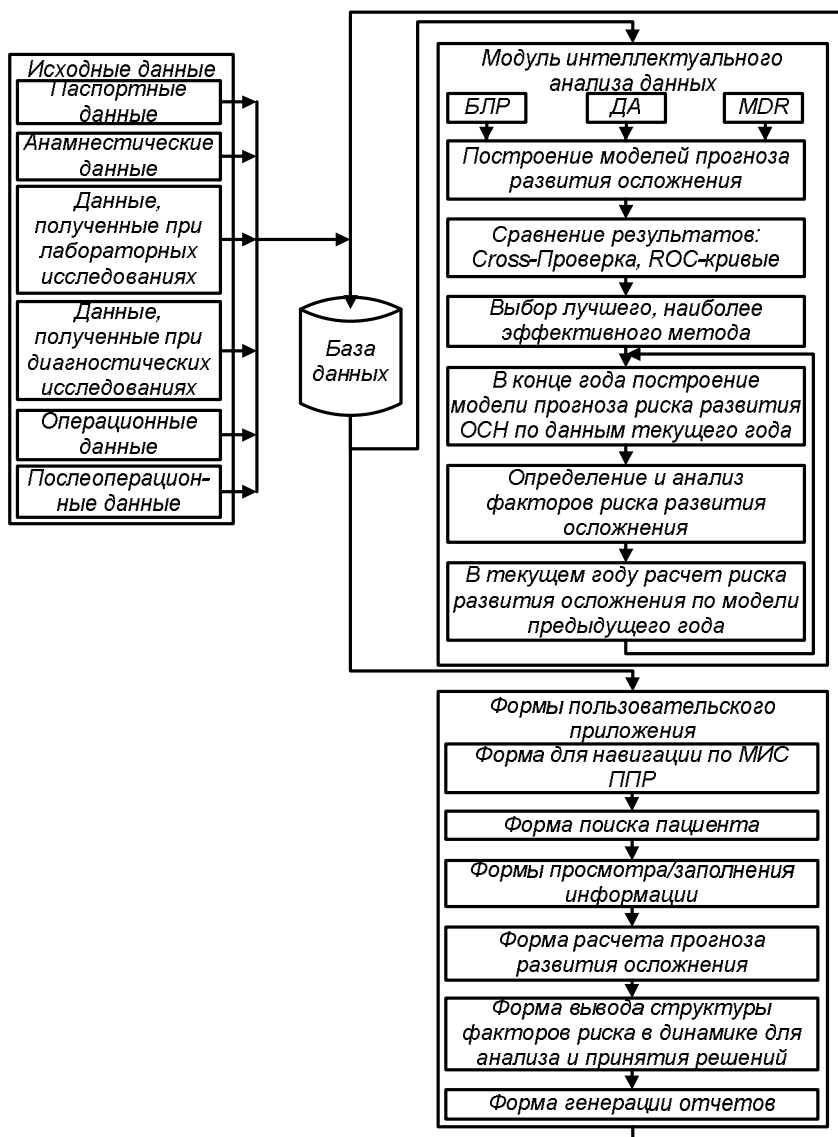


Рис. 2. Общая структура ИС: ОСН — острая сердечная недостаточность; БЛР — бинарная логистическая регрессия; ДА — дискриминантный анализ; MDR — Multifactor Dimensionality Reduction; МИС ППР — медицинская информационная система поддержки принятия решений

При проектировании систем, работающих с большими объемами данных, разработчики сталкиваются с двумя основными проблемами – обработка экспоненциально нарастающих объемов данных, поступающих в реальном времени и сокращение времени их обработки. В отделении хирургии ИБС Национального института сердечно-сосудистой хирургии им. Н.М. Амосова НАМН Украины врачи получают серию графических и видеофайлов, объем которых может занимать десятки гигабайт, а количество исследований постоянно возрастает. Поэтому выбор системы управления базой данных (СУБД) при разработке МИС являлся одной из важнейших задач на этапе проектирования.

При построении информационной системы потребовалось выбрать среду проектирования серверной и клиентской частей. Поскольку МИС должна обеспечивать обмен данными со многими пользователями, централизованная БД с сетевым доступом потребовала выбор клиент-серверной архитектуры, которая совмещает преимущества модели сетевых расчетов, высокие характеристики производства и облегчение администрирования.

В настоящее время активная конкуренция идет не между отдельными СУБД, а между их типами – реляционными и постреляционными [10].

К современным СУБД, поддерживающим модель сетевых вычислений «клиент-сервер», относятся Oracle, Informix, SyBase, Microsoft SQL Server и ряд других. Из всех параметров, по которым их можно анализировать и сравнивать было выделено несколько:

- надежность и защищенность (обеспечение безопасности и целостности данных, система ограничений и ограничителей, автоматическое архивирование, ведение системных журналов);
- быстродействие (наличие SQL-функций, хранимых процедур и оптимизация запросов);
- высокая совместимость с сетевой операционной системой;
- простота администрирования и наличие справочной литературы и документации [11].

Именно эти соображения позволили выбрать Microsoft SQL Server в качестве СУБД при разработке МИС ППР.

При разработке структуры БД МИС были сформулированы следующие принципы:

1. Система разрабатывается в условиях эксплуатации ряда программных средств.
2. Имеются значительные объемы накопленной информации, которая должна быть эффективно использована.
3. БД системы доступна из различных программных средств без использования специальных средств экспорта/импорта.
4. Накапливаемая в БД информация может формироваться в отчеты.

Результатом явилось создание БД, где центральной таблицей является таблица PATIENTS, содержащая паспортные данные больного. Сведения о пребывании больного в стационаре содержатся в таблице ADMISSION, связанной с предыдущей по уникальному ключевому полю. Именно к этой таблице могут быть подключены дополнительные таблицы, содержащие информацию об обследовании и лечении данного больного в отделении.

Массивы данных содержат последовательные наблюдения, которые были накоплены в ходе планового лечебного процесса и постепенно поступают в БД для последующего хранения, обработки и анализа, где хранятся в стандартном формате медицинских данных.

Интеграция статистических методов и СУБД позволяет создавать эффективные системы ППР различного назначения.

Так, вторым блоком, разрабатываемой МИС ППР является ИАД, в основе которого заложен разработанный алгоритм, что позволяет рассчитывать не только прогноз развития осложнения, но и определять годовые показатели значимых факторов риска (ФР).

Идея алгоритма заключается в том, что изначально анализировался ряд статистических методов, которые позволяют рассчитывать прогноз развития осложнения. Статистическая обработка материала проводилась с использованием БЛР с помощью модуля автоматического включения Binary Logistic и дискриминантного анализа с помощью модуля принудительного включения Discriminant Analysis пакета программ IBM SPSS Statistics 20.0 [12]. Нахождение взаимосвязей факторов риска между собой проводилось с помощью пакета Multifactor Dimensionality Reduction 2.0 Beta 8.4.

Прогноз риска развития ОСН осуществлялся на основе показателей, которые оказывают наибольшее влияние на ее развитие. Подробно построенные модели прогноза развития ОСН представлены в работе [13].

Для оценки влияния факторов риска на послеоперационные осложнения у пациентов с ИБС использовались критерий Пирсона и коэффициенты корреляции Спирмена и Кендалла.

В модель были включены признаки, для которых уровень статистической значимости коэффициентов корреляции с ОСН составлял $p < 0,05$.

Вторым шагом алгоритма было сравнение построенных моделей, с целью выбора наиболее эффективного метода. Для оценки чувствительности и специфичности построенных моделей была использована кросс-проверка (cross validation test), т.е. метод оценки модели и ее поведения на независимых данных.

Для определения диагностической ценности результирующей прогностической модели использовалась ROC-кривая с последующим определением площади под ней (диагностически значимым является показатель, превышающий 0,70 [6, 7]).

С помощью наиболее эффективного метода строится математическая модель прогноза развития ОСН в раннем послеоперационном периоде, на основе собранных за год данных и отбираются значимые ФР для дальнейшего анализа и воздействия лечебными мероприятиями.

Каждый последующий год по модели предыдущего года рассчитывается риск развития ОСН, а в конце года строится новая математическая модель прогноза развития осложнения и сравниваются ФР. Это позволяет отслеживать данные, влияющие на развитие осложнения, вносить коррективы в лечебный процесс и анализировать, что удалось снивелировать (рис. 3).

Работа алгоритма для пользователя представлена третьим блоком, который содержит ряд форм пользовательского приложения. При запуске

постоянную практику ряд дополнительных лечебных мероприятий.

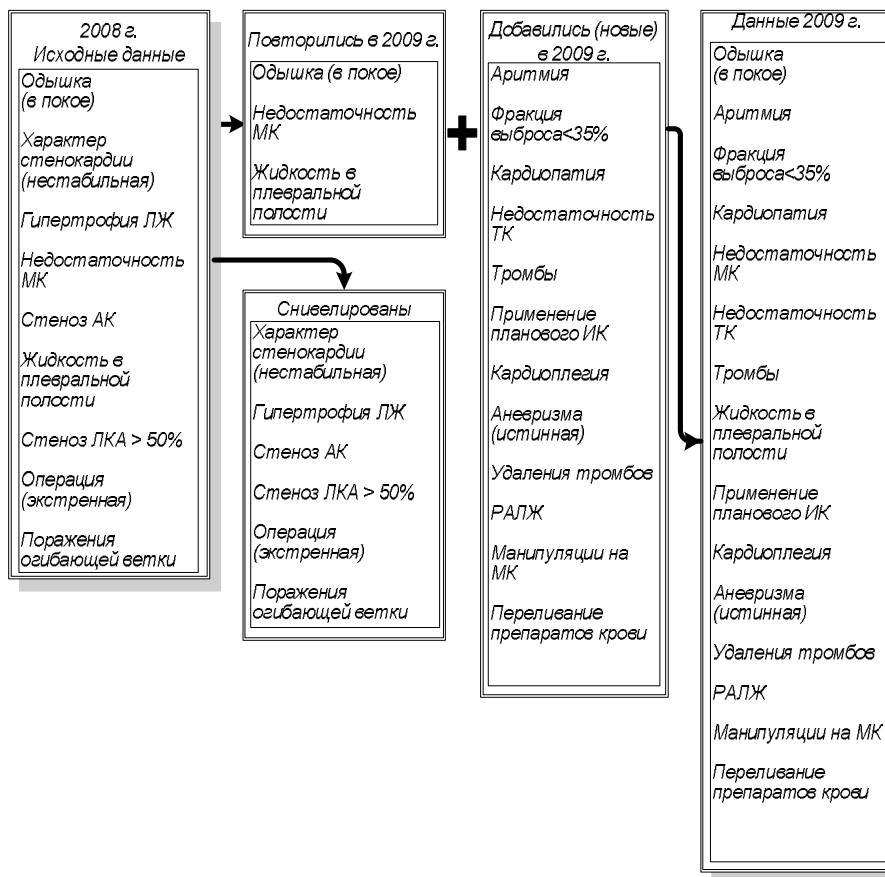


Рис. 4. Пример работы алгоритма для анализа динамики факторов риска:
 ЛЖ — левый желудочек; МК — митральный клапан; АК — аортальный клапан;
 ЛКА — левая коронарная артерия; ТК — трикуспидальный клапан;
 ИК — искусственное кровообращение; РАЛЖ — резекция аневризмы
 левого желудочка

Выводы

Спроектированная информационная система полезна для сопровождения лечебного процесса, оценки риска развития осложнений в раннем послеоперационном периоде и для выявления структуры факторов-предикторов влияющих на развитие ОСН.

Разработанная ИТ построения прогностических моделей на основе ИАД позволяет неограниченно расширять спектр прогнозируемых осложнений и дает возможность выявлять пациентов повышенного риска. Кроме того, она является инструментом для врача в принятии решений с целью коррекции лечебных мероприятий и минимизации риска развития осложнений.

Система показала свою эффективность при тестовом использовании на ретроспективных данных, а также в реальных условиях лечебного процесса. Разработанные модели позволяют с высокой надежностью (более 90 %) прогнозировать вероятность развития осложнения в раннем

послеоперационном периоде. В статье приведены результаты для тестовой выборки 2008 г.

1. Ланг Т.А. Как описывать статистику в медицине / руководство для авторов, редакторов и рецензентов / Т.А. Ланг, М. Сесик. — М. : Практическая Медицина, 2011. — 480 с.
2. Григорьев С.Г. Логистическая регрессия. Многомерные методы статистического анализа категориальных данных медицинских исследований : уч. пособие / С.Г. Григорьев, В.И. Юнкеров, Н.Б. Клименко. — СПб, 2001. — С. 10–21.
3. Дискриминантный анализ / Дж.-О. Ким [и др.] // Факторный, дискриминантный и кластерный анализ. — М. : Финансы и статистика, 1989. — С. 78–138.
4. Jakulin, A. Quantifying and Visualizing Attribute Interactions / A. Jakulin, I. Bratko // An Approach Based on Entropy. PKDD. — 2004. — Vol. 3. — P. 229–240.
5. Дюк, В. Data Mining: учебный курс / В. Дюк, А. Самойленко. — СПб. : «Питер». — 2001.
6. Risk stratification and therapeutic decision making in acute coronary syndromes / E.M. Ohman, C.B. Granger, R.A. Harrington, K.L. Lee // JAMA. — 2000. — Vol. 8. — 284 p.
7. Бирман Э.Г. Сравнительный анализ методов прогнозирования / Э.Г. Бирман. — НТИ. Сер. 2. — 1986. — № 1. — С. 11–16.
8. Дерябкин В.П. Проектирование информационных систем по методологии UML : методические указания к учебно-лабораторному практикуму / сост. В.П. Дерябкин, В.В. Козлов. — Самара : Самарск. гос. арх.-строит. ун-т, 2008. — 42 с.
9. Маклаков С.В. BPwin ERwin CASE-средства разработки информационных систем / С.В. Маклаков. — М. : Диалог-МИФИ, 2001. — 304 с.
10. Кузнецов С.Д. Основы баз данных / С.Д. Кузнецов — 2-е изд. — М. : Интернет-университет информационных технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. — 484 с.
11. Гарсиа-Молина Г. Системы баз данных. Полный курс / Г. Гарсиа-Молина, Дж. Ульман, Дж. Уидом. — М. : Вильямс, 2003. — 1088 с.
12. Бююль, А. SPSS: искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей : пер. с нем. — СПб. : ООО «ДиаСофтЮП», 2005. — 608 с.
13. Выявление структуры факторов риска развития острой сердечной недостаточности в раннем послеоперационном периоде / А.В. Яковенко, А.В. Руденко, Е.А. Настенко, Н.Л. Руденко, В.А. Павлов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2013. — № 3/10 (63). — с. 4–8.

Получено 19.06.2014

UDC: 681.5

**WELL-POSED IDENTIFICATION OF NUCLEAR
TYPE INFINITE AND MULTIDIMENSIONAL
SYSTEMS**

V.F. Gubarev, A.V. Gummel, S.V. Melnychuk

*Space Research Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine and State
Space Agency of Ukraine, Kiev, Ukraine*

Introduction: System identification problems have the feature that under certain conditions its solutions become highly sensitive to the errors in input data. Especially it takes place in multidimensional cases when even an appropriate model set of the original system is unknown. In such cases it is necessary to use different infinite-dimensional expansions as model set. Hence there is a problem of approximation infinite-dimensional linear system by finite-dimensional ones. Selection of model order is defined by the well-posedness which should ensure the solution sustainability.

Purpose: The purpose of research is to establish and study conditions, that define when system identification problems are well-posed and when solutions become unstable and therefore practically unfit for parametric-structural identification on the base of description in the form of infinite expansions.

Results: It was shown that solution high sensitivity is associated with ill-conditioned matrices that are used to estimate the coefficients of the model. For finite-frequency and subspace identification methods it was demonstrated that depending on the ratio of the input data error and the condition number of matrix the solution of identification problem can be both stable and unstable.

In multiple experiments with different system on the plane of these two parameters distribution of models by stability was obtained which allowed us to construct the stability domains. Further this domains can be used in regularizing procedure when selecting the model order.

Conclusions: Identification problems of infinite or multidimensional systems may be fully treated as essentially ill-posed. It is shown that this property is fundamental regardless what kind of method is applied.

Correct solution of identification problem is almost always requires the use of regularization procedures which imposes restrictions on the model dimension. Resulting reduced model approximate the real system with respect to output only so model parameters can differ from the same parameters of the real system.

Keywords: system identification, ill-posed problem, finite-frequency identification, subspace (4SID) identification, regularization.

1. Funrman P.A. *Linear Systems and Operators in Hilbert Space*. McGraw-Hill, New York. 1981. 476 p.
2. Glover K., Curtain R.F., Partington J.R. Realization and Approximation of Linear Infinite-Dimensional Systems with Error Bounds. *SIAM Journal Control and Optimization*, 1988, vol. 26, no. 4, pp. 863–897.
3. Gubarev V.F. Problem-oriented identification and control in the system with distributed

- parameters. *Problems of Control and Informatic*, 2000, no. 3, pp. 26–37 (in Russian).
4. Gubarev V.F. Rational approximation of the system with distributed parameters. *Cybernetic and system analysis*, 2008, no. 2, pp. 99–116 (in Russian).
 5. Gubarev V., Zhukov O. Rational Approximation and Identification of Distributed Parameter Systems. *Proceedings of the 17-th World Congress IFAC. July 6–11 2008*. Seoul, Korea, pp. 6452–6457 (in Russian).
 6. Antoulas A.C., Sorensen D.C., Gugercin S. A survey of model reduction methods for large-scale systems. *Contemporary mathematic*, 2001, **280**, pp. 193–219.
 7. Alexandrov A.G. Method of frequency parameters. *Automatica and Telemekhanick*. 1988, **50**, no. 12, pp. 3–5 (in Russian).
 8. Alexandrov A.G. Finite-frequency identification: multidimensional object. *International conference on control problem*. Proc. of the conf. Moscow: Institute of control problem RAS, 1999, no. 1, pp. 15–28 (in Russian).
 9. Orlov Yu.F. Frequency parameters identification under parallel tests. *Automatica and Telemekhanick*, 2007, **68**, no. 1, pp. 20–40 (in Russian).
 10. Gubarev V.F., Melnichuk S.V. Identification of multidimensional system using steady-state parameters. *Problems of Control and Informatic*, 2012, no. 5, pp. 26–43 (in Russian).

UDC: 519.9

EXTERNAL ELLIPSOIDAL APPROXIMATION OF REACHABLE SETS OF DYNAMIC SYSTEMS

N.A. Babii, V.V. Volosov, V.M. Shevchenko

Space Research Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine, Kiev, Ukraine

Introduction: The methods for constructing the external ellipsoidal estimates of reachable sets of discrete and continuous dynamic systems (DS), susceptible to external bounded disturbances are proposed. Effectiveness of this method is illustrated by the example of the system control of a solid body angular motion.

The purpose: Development of constructive methods for constructing ellipsoidal estimates of reachable sets DS and obtaining guaranteed accuracy estimates of DS control systems in steady mode.

Results: Ellipsoidal estimates reachable sets of continuous and discrete DS obtained according to consistent methodological approach based on using the support functions apparatus of convex sets and methods of mathematical programming. The proposed methods are locally optimal by matrix trace criteria of estimating ellipsoids. Ellipsoidal estimates of limit sets of continuous linear DS with bounded external disturbances are obtained based on use known General direct Lyapunov method. As exemplified by control of a solid body angular motion, ellipsoidal estimates of limit sets and asymptotic estimates of reachable sets are complementary. The intersection of these sets is an improved estimate of steering control accuracy in the steady mode.

Conclusions: In order to obtain estimates of the accuracy of the DS control systems it seems to be reasonable using Lyapunov direct method and methods for constructing ellipsoidal estimates of reachable sets of DS.

Keywords: dynamic system, uncertainty, ellipsoidal estimates, reachable set, limit set.

1. Chernousko F.L. *Estimation of the dynamic systems phase state. Method of ellipsoids*. Moscow: Science, 1988. 320 p. (in Russian).
2. Kuntcevich V.M., Kurzhanskiy A.B., Attainability of certain classes of linear and nonlinear discrete systems and management. *Control and Informatics*, 2010, no. 1, pp. 5–20 (in Russian).
3. Kuntcevich V.M. Invariant sets (area dissipativeness) nonlinear discrete systems in the analysis and synthesis of control systems. *Plenary sessions of the International Multi Conference "Theory and Control Systems."* Moscow, 26–30 of January 2009, pp.206–217 (in Russian).
4. Ovseevich A.I., Chernousko F.L., Properties of optimal ellipsoids approximating the reachable systems with uncertainties. *A Journal of Russian Academy of Sciences. Theory and control systems*. 2004, no 4, pp. 8–18 (in Russian).
5. Gusev M.I. Estimates of reachable sets of multidimensional control systems with nonlinear interconnections. *Proc. of IMM RAS*, 2009, vol 16, no 1, pp. 223–232 (in Russian).
6. Ushakov V.N., Matviichuk A.R., Ushakov A.V. Approximation of attainable sets and integral funnels of differential inclusions. *Vestn. Udmurtsk University*, 2011, vol. 4, pp. 23–39 (in Russian).
7. Rockafellar R. *Convex analiz*. Moscow, 1973. 470 p. (in Russian).
8. Pshenichnii B.N., Danilin Y.M. *Numerical methods in extremal problems*. Moscow: Science, 1975, 320 p. (in Russian).
9. Polovinkin E.S., Balashov M.V. *Elements of convex and strongly convex analysis*. Moscow: Fizmatlit, 2004. 416 p. (in Russian).
10. Schweppe F.C. Recursive state estimation: unknown but bounded error and system inputs. *IEEE Trans. Automat Control*, 1968, vol. AC-13, no. 1, pp. 22–28.
11. Bahvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobelkov G.M. *Numerical methods*. Moscow: Science, 1987, 600 p. (in Russian).
12. Kurzhanski A.B. *Management and supervision in the face of uncertainty*. Moscow: Science, 1977, 392 p. (in Russian).
13. Zubov V.I. *Stability of motion*. Moscow: Higher School, 1973, 272 p. (in Russian).
14. Kuntcevich V.M., Lychak M.M. *Synthesis of automatic control systems via Lyapunov functions*. Moscow: Science, 1978, 400 p. (in Russian).
15. Volosov V.V. Control of the orientation of the spacecraft in orbital coordinate system using ellipsoidal estimates its state vector. *Problems of Control and Informatics*. 1998, no 5, pp 31–41 (in Russian).
16. Voevodin V.V., Kuznetsov Y.A. *Matrix and calculations*. - Moscow: Science, 1984, 320p.
17. Volosov V.V., Kalita A. Study of algorithm of simultaneous estimation of parameters and the phase state of a discrete dynamic object. *Cybernetics and Computer Engineering*, 1988, vol 79, pp.23–28 (in Russian).

UDC: 517.977

OPTIMAL CONTROL BY VIBRATIONS OF A RECTANGULAR MEMBRANE

M.M. Kopets

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine

Introduction: In the theory of optimal control one of the central role rightly takes linear quadratic problem. For controlled systems with lumped parameters this problem was studied in sufficient detail that cannot be argued about a similar problem for systems with distributed parameters. In this article the linear- quadratic problem is investigated by the modern methods of variational calculus and mathematical physics. The purpose of this article is to study the linear- quadratic problem of optimal control of oscillations of a rectangular membrane, namely obtaining necessary optimality conditions and the derivation of the formula for

calculating the optimal control.

Statement of the Problem: Controlled process is described by a two-dimensional wave equation with partial derivatives. There are given the initial conditions and homogeneous boundary conditions. The cost functional is a quadratic. Admissible control which is implemented at least the cost functional is called optimal.

The main results: The author of the article obtains the necessary optimality conditions. At their bases derived a system of integro-differential Riccati equations with partial derivatives. The solution of this system provided an opportunity to write an explicit formula for calculating the optimal control.

Conclusions: In this paper a system of integro-differential equations with partial derivatives of the Riccati for linear quadratic optimal control problem of a rectangular membrane vibration process is obtained. The solution of this system provides the ability to write an explicit formula for calculating the optimal control. Promising for further study is to obtain similar results for the case of a circular membrane. Also of note is the advisability of generalization of the results obtained in this paper for the case of systems with fractional derivatives.

Keywords: optimal control, the method of Lagrange multipliers, Ruccato equation.

1. Andreev Yu.N. *Control by finite dimensional linear objects*. Moscow: Nauka, 1976. 424 p. (in Russian).
2. Roytenberg Y.N. *Automatic control*. — Moscow: Nauka, 1971. 396 p. (in Russian).
3. Butkovskiy A.G. *Theory of optimal control by distributed parameter systems*. Moscow: Nauka, 1965. 476 p. (in Russian).
4. Butkovskiy A.G. *Methods of systems with distributed parameters*. Moscow: Nauka, 1975. 568 p. (in Russian).
5. J.-L. Lions. *Optimal control of systems described by partial differential equations*. New York: Wiley, 1972. 414 p. (in Russian).
6. Sirazetdinov T.K. *Optimization of distributed parameter systems*. Moscow: Nauka, 1977. 480 p. (in Russian).
7. Chikrii A.A., Eidel'man S.D. Game control problem for quasi-linear systems with fractional derivatives of Riemann-Liouville. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2012. no. 6, pp. 66–99 (in Russian).
8. Eidel'man S.D., Chikrii A.A. Dynamic game approach problem for equations of fractional order. *Ukr. mat.zhurn.* 2000, vol. 52, no. 11. pp. 1566–1583 (in Russian).

UDC: 004.7:004.9:681.518

A WAY TO ORGANIZE EFFECTIVE DATA EXCHANGE IN NETWORK-BASED CONTROL SYSTEM FOR DYNAMIC OBJECTS

S.V. Pavlova, Yu.P. Bohachuk, S.V. Melnikov, O.Yu. Gospodarchuk

*International Research and Training Centre for Information Technologies and Systems
of the National Academy of Sciences of Ukraine and Ministry of Education and Sciences
of Ukraine, Kiev, Ukraine*

Introduction: Perspective air traffic control and air traffic management systems will use global telecommunication structure based on multiservice network. The use of existing network protocols and communication channels in multiservice network for remote control of manned and unmanned aircrafts may be hampered by

transmission delays and information loss.

Purpose: The purpose of the work is to give an analysis of existing and perspective network protocols and techniques in terms of suitability for use in multiservice networks for remote control of dynamic objects and estimate the impact of control data transmission delays on quality of remote control of dynamic object using the task of aircraft trajectory control as an example.

Results: The major factors that make an impact on quality of work of distributed in navigational computer network aircraft control system are the network delay that shifts in time data packets transmitted from an aircraft to the remote control system and transmission network delay for command packets from control system to the aircraft. It is shown that use of modern protocols and techniques makes it possible to significantly enhance speed and cut delays for transmission of control data over network structures within control system. Network transmission speed can be increased in times when small amount of redundancy is introduced in the network communication channel for given packet loss rate. Results of modeling of remote system for aircraft trajectory control shows that it is possible to build distributed control system that is invariant to control data transmission delays in a broad range of delays (100–700 ms) which are typical for real-world networks.

Conclusion: To build effective control system with distributed informational and executive resources one need to separate data exchange streams based on importance for control quality and acceptable data transmission delays. Data exchange protocols, channels and traffic routs should be selected based on properties of specific informational streams. Structures and protocols that provide redundancy and duplication of transmitted information should be considered. Selection of specific data transmission protocols and techniques can be combined and complemented with developed methods for control of high-speed dynamic processes and proper distribution of control components between controlled object and remote control system.

Keywords: network, network protocol, remote control, data exchange, FEC technology, distributed control system, aircraft control, high-speed cycles control.

1. *Doc 9750-AN/963, 2013–2028 Global Air Navigation Plan*. International Civil Aviation Organization, 2013. 128 p.
2. Melnikov S.V. Organizational principles of complex ergatic systems and structural desing of remote control systems for dynamic objects. *Cybernetics and Computer Engineering*, 2012, no. 168, pp. 70–79 (in Russian).
3. *Taking Forward Error Correction (FEC) To The Next Level*. Silver Peak [Official website]. White Paper. Available at: https://www.silver-peak.com/sites/default/files/infoctr/silver-peak_wp_fec.pdf (accessed 4 June 2014).
4. *QUIC: Design Document and Specification Rational*. Google Documents [Official website]. Available at: https://docs.google.com/document/d/1RNHkx_VvKWyWg6Lr8SZ-saqsQx7rFV-ev2jRFUoVD34/edit (accessed 4 June 2014).
5. *Airworthiness and Operational Approval of Traffic Alert and Collision Avoidance Systems (TCAS II) and Mode S Transponders*. U.S. Dept. of Transport. Federal Aviation Administration, 2002. 51 p.
6. Pavlov V.V., Pavlova S.V., Bohachuk Y.P. *Method and apparatus for computer networks of application process high-speed cycles control*. Patent 83118 Ukraine, Int.Cl. (2006) H04L 12/66 G05B 15/02 G05B 17/00, 2008 (in Russian).

INFORMATION TECHNOLOGY OF PSYCHOPHYSIOLOGICAL MAINTENANCE OF OPERATOR'S ACTIVITY HIGH RELIABILITY

V.V. Kalnysh, A.V. Shvets

*Research Institute of Military Medicine of Ukraine Military Medical Academy, Kiev,
Ukraine*

Introduction: Human reliability is a complex parameter, which has to take into account semantic aspects, the pace of activity, complexity, intensity, and sequence of tasks, information overload arising from this; various external influences, as well as qualitative characteristics of activity. That is why technocratic understanding of psychophysiological mechanisms of ensure human activity reliability is limited in relation to human activity that requires the creation of medical information technology for complex foregoing problem solving.

Purpose: Creation of information technology for the implementation of psychophysiological ensure high reliability of operator activity.

Methods: Analysis of the results was performed using the following methods: nonlinear regression, cluster analysis, factorial ANOVA using the data analysis software system STATISTICA 6.1.478.0.

Results: The most important task for solving this problem is to build such information technology which would take into account the peculiarities of human-machine interaction. Therefore, it is advisable to use several approaches for its realization. The first approach is to use special integrated indicators, taking into account the fundamental characteristics of his organism (sex, age, severity of PVC, etc.) influence on working person behavioral responses. The second approach aims to determine the reliability of a possible reduction of the human impact on the characteristics of the job. It makes the technology more demanding but physiologically adequate in implementation when each operator is working at his best that extremely narrow degree of freedom in the solutions choice, limiting its effect on the solvable task parameters. The third approach is based on the using feedback test data and ignores the obvious fact that the operator can work correctly for a long time under low intensity presented tasks. To maintain the reliability of the operator's activity in information technology a special correction unit and monitoring unit psychophysiological qualities operator have been included. As a result of performed analysis, the information technology to maintain high reliability of operator activity has been created. It takes into account the information processes on different levels of hierarchically organized ergatic system human — machine — environment, and consists of several information blocks focused on assessing correction and monitoring the reliability of the operator's activity.

Conclusions: The fundamental causes of operator error based on the existence of objective contradictions between existing imperfection of human knowledge about controlled processes and its decision-making, as well as the incompleteness of the rules governing the operator's actions in specific, unusual situations leading to misinterpretation of the problems have been identified. A structural-functional hierarchical system of operator's activity reliability formation, taking into account the effect of various factors in the ergatic system on the quality of work has been

proposed. The information technology of psychophysiological maintenance operator's activity high reliability consisting of several parts: the psychophysiological assessment of reliability of operator's activity integral characteristics, parameters of limited feasibility of activity and reliability profile of activity based on the allometric model characteristics; correction reliability of an operator using training occupationally important qualities; monitoring psychophysiological qualities has been .

Keywords: information technology, hierarchical information model, allometric model, operator's activity reliability.

1. Voytenko A.M. Psychophysiological analysis of the erroneous actions causes of human operator. *Herald Baltic Pedagogical Academy*, 2006, vol. 69, pp. 49–57 (in Russian).
2. Novak D., Mihelj M., Munih M. Dual-task performance in multimodal human-computer interaction: a psychophysiological perspective. *Multimedia Tools and Applications*, 2012, vol. 56, no. 3, pp. 553–567.
3. Himma K.E. The concept of information overload: A preliminary step in understanding the nature of a harmful information-related condition. *Ethics and Information Technology*, 2007, vol. 9, pp. 259–272.
4. William M. Mount, Deborah C. Tuček, Hussein A. Abbass Psychophysiological evaluation of task complexity and cognitive performance in a human computer interface experiment. *Neural Information Processing: Lecture Notes in Computer Science. 19th Int. Conf., ICONIP 2012, Doha, Qatar, November 12–15, 2012*, vol. 7663, pp. 600–607.
5. Theerasak P. Information overload among professionals in Thailand. *Journal of Information Technology Impact*, 2010, vol. 10, no. 3, pp. 171–200.
6. Akhutin V.M. Activity of Berg A.I. in the field of bionics and biomedical cybernetics. *Electronics and Communication*, 1993, no. 1, pp. 13–16.
7. Derkach A.A., ed. *Acmeology*. Moscow: RAGS, 2006. 424 p. (in Russian).
8. Rembezy A.I., ed. *Reliability and efficiency in engineering Handbook*. Vol. 1.: Methodology. Organization. Terminology. M.: Mechanical Engineering, 1986. 224 p. (in Russian).
9. Kotick M.A. *Psychology and security*. Tallinn: Valgus, 1989. 448 p. (in Russian).
10. Pavlov V.V. *The Systems Man — Machine: Problems and Synthesis*. Kiev: High School, 1987. 55 p. (in Russian).
11. Zarakovsky G.M., Pavlov V.V. *Patterns of the ergonomics systems functioning*. Moscow: Radio and communication, 1987. 232 p. (in Russian).
12. Nikiforov G.S. *Reliability of Professional Activities*. Publishing House of St. Petersburg University, 1996. 172 p. (in Russian).
13. Zazykin V.G., Chernyshev, A.P. *Acmeological Problems of Professionalism*. Moscow: NIIVO, 1993. 134 p. (in Russian).
14. Nebylitsyn V.D. The operator's reliability in the complex control system and its physiological factors. *Psychophysiological Study of Individual Differences*. Moscow: Science, 1976, pp. 194–208 (in Russian).
15. Nersessian L.S., Konopkin O.A. *Engineering Psychology and the Problem of an Engine Operator's Reliability*. Moscow, 1978. 240 p. (in Russian).
16. Tolochek V.A. *Modern labor psychology: Textbook*. St. Petersburg.: Peter, 2008. 432 p. (in Russian).
17. Kalnish V.V. Information models of the reliable operator activity formation. *Clinical informatics and telemedicine*, 2009, no. 6, pp. 18–25 (in Russian).
18. Makarenko M.V., Lizogub V.S., Kozhemyako T.V., Chernenko N.F. Age characteristics of the speed of central information processing in persons with different levels of functional mobility of nervous processes. *Int. Journal of Physiology and Pathophysiology*, 2011, vol. 2, no. 4, pp. 335–341.
19. Dikaya L.G. Problems of the modern labor psychology. *Psychological Journal*, 1992, no. 3, pp. 24–41 (in Russian).
20. Kalnysh V.V., Shvets A.V. Effect of intense 24-hour shift work on reliability of operators'

- activity. *Human Physiology*, 2012, vol. 38, no. 3, pp. 294–302.
21. Pushkin V.T. *Reliability problem*. Moscow: Science, 1971. 189 p. (in Russian).
 22. Shvets A.V., Kalnish V.V. Peculiarities of different psychophysiological statuses' influence on reliability of operator's activity. *Military Medicine of Ukraine*. 2009, no. 1, pp. 84–91 (in Ukrainian).
 23. Nagel E., Newman J.R. *Gödel's Proof*. NYU Press; Revised edition, 2008. 160 p.
 24. Gelfand I.M., Gurfinkel V.S., Tsetlin M.L. About the tactics of the complex systems managing in relation to physiology. *Biological Aspects of Cybernetics*. Moscow, 1962. pp. 66–73 (in Russian).
 25. Kalnish V.V., Shvets A.V., Levit Jo.R. Gender features of reliability of operator's activity. *Journal of National Academy of Medical Sciences of Ukraine*, 2009, vol. 15, no. 4, pp. 755–768 (in Ukrainian).
 26. Changxu Wu, Yili Liu, Quinn-Walsh C.M. Queuing network modeling of a real-time psychophysiological index of mental workload — P300 in event-related potential (ERP). *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 2008, vol. 38, no. 5, pp. 1068–1084.
 27. Ena T.A. Hygienic and psychophysiological assessment of grid-control engineers' occupational activity. *Ukraine Journal of Occupational Medicine Problems*, 2008. vol. 13, no. 1, pp.13–19 (in Ukrainian).
 28. Ena T.A., Kalnish V.V. Grid-control engineers' occupationally important qualities. *Ukraine Journal of Occupational Medicine Problems*, 2010, vol. 24, no. 4, pp. 11–20.
 29. Kalnish V.V., Firsov A.G., Shvets A.V., Eshchenko A.I. Peculiarities of operator's status classification based on fussy logic. *Cybernetics and Computer Engineering*, 2011, vol. 166, pp. 55–67 (in Russian).
 30. Kalnish V.V., Shvets A.V. Peculiarities of assessment the quality of operators's activity using reliability profile. *Clinical Informatics & Telemedicine*, 2013, vol. 9, pp. 123–130, (in Ukrainian).

UDC: 519.6+612

A FORMAL ANALYSIS OF MECHANISMS INCREASING ARTERIAL PRESSURE

R.D. Grygoryan

Institute of Software Systems of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine

Introduction: Arterial hypertension (AH) is a multi-factor disease indicated by an elevation of end-systolic and end-diastolic peaks of arterial pressure (AP). Currently, AH's cure is symptomatic and palliative because our understanding of mechanisms controlling AP is not comprehensive.

The purpose of the paper is to propose an extended view of mechanisms regulating long-term level of mean arterial pressure (MAP).

Results: To reach this goal, the energy theory of reversible adaptation is used. The theory ensures that in vertebrates (in particular, in humans) there is a multi-scale energy megasystem (EMS) fighting against continuously lack of ATP in every cell. EMS is a complex system constituted of multiple partners. It is shown that cell-scale mechanisms balancing mean rates of ATP synthesis and consumption are functioning in two-side relationships with organism-scale mechanisms. The cardiovascular system (CVS) is a structural-functional part of EMS that materially provides both the mitochondrial respiration and mitochondrial enlargement (via hypertrophy/proliferation) in every cell. Under stable organism-scale physiology indicated in form of a stable energy consumption rate, the level of MAP inversely correlates with a total surface of cells mitochondria. On long-term scales, lung

ventilation, blood erythrocytes amount, and blood glucose are also in inverse correlation with MAP. These reciprocal relationships suppose that there will be an individual normal value of AP. This value does depend on relative investments of EMS's sub-units in providing of ATP synthesis.

Conclusions: An increase of MAP in CVS will appear every time when the remained partners in EMS cannot properly compensate the lack of material incomes into cell mitochondria. This general view of roles playing by CVS and MAP in organism suggest that AH is rather a compensatory response of entire organism to energy lack than a disease.

Keywords: arterial hypertension, energetics, circulation physiology, models.

1. Ferrari A.U. Modifications of the cardiovascular system with aging. *Am. J. Geriatr. Cardiol.* 2002, vol. 11, no. 1, pp. 30–33.
2. Rhian T.M. New insights into mechanisms of hypertension. *Current Opinion in Nephrology & Hypertension.* 2012, vol. 21, issue 2, pp.119–121.
3. Chobanian A.V. The hypertension paradox: more uncontrolled disease despite improved therapy. *N. Engl. J. Med.*, 2009, vol. 361, pp. 878–887.
4. Kumar R., Thomas C.M., Yong Q.C., Chen W., Baker K.M. The intracrine renin-angiotensin system. *Clin. Sci. (Lond)*, 2012, vol. 123, pp. 273–284.
5. Cowley A.W. Jr. Renal medullary oxidative stress, pressure-natriuresis, and hypertension. *Hypertension*, 2008, vol. 52, pp. 777–786.
6. Kirchhiem H.R. Our fragmentary knowledge of the regulatory functions of ANG II "fragments": are we beginning to see the light? *American journal of physiology. Regulatory, integrative and comparative physiology*, 2003, vol. 285, pp. 937–938.
7. Grygoryan R.D. *The Energy basis of reversible adaptation.* N.Y.: Nova Science, 2012. 254 p.
8. Grygoryan R.D. The energy concept of arterial pressure. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2011, no. 7, pp. 148–155 (in Russian).
9. Grygoryan R.D. An individual physiological norm: the concept and problems. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2013, no. 8, pp.156–162 (in Russian).
10. Skov J., Persson F., Frøkiær J., Christiansen J.S. Tissue renin-angiotensin systems: a unifying hypothesis of metabolic disease. *Front Endocrinol (Lausanne)*, 2014, vol. 28, pp. 5–23.
11. Hardie DG. AMPK: a key regulator of energy balance in the single cell and the whole organism. *Int J Obes (Lond)*, 2008, vol. 32, suppl. 4, pp. 7–12.
12. Lawrence H.Y. AMP-Activated protein kinase conducts the ischemic stress response orchestra. *Circulation*, 2008, vol. 117, pp. 832–840.
13. Ouchi N, Shibata R, Walsh K . AMP-activated protein kinase signaling stimulates VEGF expression and angiogenesis in skeletal muscle. *Circ. Res*, 2005, vol. 96, pp. 838–846.
14. Lee W.J., Kim M., Park H.S., Kim H.S., Jeon M.J., Oh K.S., Koh E.H., Won J.C., Kim M.S., Oh G.T., Yoon M., Lee K.U., Park J.Y. AMPK activation increases fatty acid oxidation in skeletal muscle by activating PPAR alpha and PGC-1. *Biochem. Biophys. Res. Commun*, 2006, vol. 340, pp. 291–295.
15. Zong H., Ren J.M., Young L.H., Pypaert M., Mu J., Birnbaum M.J., Shulman G.I. AMP kinase is required for mitochondrial biogenesis in skeletal muscle in response to chronic energy deprivation. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 2002, vol. 99, pp.15983–15987.
16. Kohlstedt K., Trouvain C., Boettger T. et al. AMP-activated protein kinase regulates endothelial cell angiotensin-converting enzyme expression via p53 and the post-transcriptional regulation of microRNA-143/145. *Circ. Res*, 2013, vol. 1121, pp. 150–1158.

DESIGN FEATURES OF THE MEDICAL INFORMATION DECISION SUPPORT SYSTEM BASED ON DATA MINING

G.V. Knishov¹, A.V. Rudenko¹, E.A. Nastenکو^{1,2}, A.V. Yakovenko²,
S.O. Siromaha¹, S.S. Galych¹

¹*Amosov National Institute of Cardiovascular Surgery of the National Academy of
Medical Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine*

²*National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic University", Kiev, Ukraine*

Introduction: Tendency for data mining today is great. Often, in the datasets there is missing implicit knowledge that can be obtained with the help of modern information technologies and methods of data mining. Use of this information technologies allows automatization of processes for extraction of data that help to get interesting knowledge and regularities. The formalization of semistructured and unstructured tasks is no less important.

The integration of statistical methods and database management systems allows to create an effective decision support systems for various purposes.

Improving the efficiency of treatment can be achieved by applying data mining methods.

The purpose of this work is the description of the stages of design of information system based on data mining for prediction of complications and decision support.

Results and discussion: The developed information system consists of a database module, data mining module and generation decisions making module. The generation module of decision making presented as a custom application. The database module allows to organize and store information. The basis of the module of data mining is the algorithm that allows to calculate not only the prediction of complications, but also to determine the annual indicators of significant risk factors which is useful in making medical decisions. The first stage of the algorithm is the comparison of statistical methods to determine the most effective. The second is the construction of mathematical models to forecast the development of complications chosen method. The third is the comparison of risk factors and outcomes models. This provides the forecast of the development of complications. In addition, it provides the tools necessary for the correction of treatment. Under the previous comparative analysis revealed that the binary logistic regression gives a higher percentage of correct assignment, the sensitivity and specificity which is indicative of high quality of the resulting model. A method MDR helps to identify a hierarchy relationships between risk factors and systematic communication themselves. It gives the possibility to determine the direction, strength of influence and to which extent the factors with the help of entropy.

Conclusions: A medical information decision support system is developed. It allows to identify high-risk patients. A retrospective evaluation of prognosis of complications was also carried out that allows dynamically optimize the structure of the therapeutic measures to reduce the risk and severity of complications in the early postoperative period in patients with coronary heart disease after coronary artery bypass surgery.

Keywords: Medical information system, decision support, data mining, correction of the treatment process.

1. Lang T.A. Michelle Secic How To Report Statistics in Medicine. *Annotated Guidelines for Authors, Editors, and Reviewers*. 2010. 485 p. (in Russian).
2. Grigorev S.G., Unkerov V.I., Klimenko N.B. *Logistic regression. Multivariate statistical analysis of categorical data for Medical Research*. SPb, 2001. Pp. 10–21 (in Russian).
3. Kim J.O., Muller C.W., Klekka W.R. et al. *Factor, discriminate and cluster analysis*. Moscow: Finansy i statistica, 1989. Pp. 78–138 (in Russian).
4. Jakulin A., Bratko I. *Quantifying and Visualizing Attribute Interactions*. An Approach Based on Entropy. PKDD, 2004, vol. 3, pp. 229–240 (in Russian).
5. Duke V., Samoilenko A. *Data Mining: Training Course*. St. Petersburg. "Peter", 2001 (in Russian).
6. Ohman E.M., Granger C.B., Harrington R.A., Lee K.L. *Risk stratification and therapeutic decision making in acute coronary syndromes*. JAMA, 2000, vol. 8, 284 p. (in Russian).
7. Biermann E.G. *Comparative analysis of methods for forecasting*. STI, (2) № 1, 1986, pp. 11–16 (in Russian).
8. Deryabkin V.P., Kozlov V.V. *Information systems development by methodology UML: Guidelines for teaching and laboratory practical*. Samara. Reg. architect-building. Univ: Samara, 2008. 42 p. (in Russian).
9. Maklakov S.V. *BPwin i Erwin, CASE-tools of information systems development*. Moscow: DIALOG-MIFI, 2001. 304 p. (in Russian).
10. Kuznetsov S.D. *Basics of Databases*. Moscow: Internet-University of Information Technologies; BINOM. Laboratory of Knowledge, 2007. 484 p. (in Russian).
11. Hector Garcia-Molina, Ullman Jeffrey D., Widom Jennifer D. *Database Systems: The Complete Book*. Moscow: Vilyams, 2003. 1088 p. (in Russian).
12. Byuyul Tsefel A.P. *SPSS: art information processing. Analysis of statistical data and restore hidden patterns*. St. Petersburg: DiaSoftYuP, 2005. 608 p. (in Russian).
13. Yakovenko A.V., Rudenko A.V., Nastenka E.A., Rudenko N.L., Pavlov V.A. Identification of risk factors for acute heart failure in early postoperative period. *Eastern European journal of enterprise technologies*, 2013, no. 3/10 (63), pp. 4–8. (in Russian).

АВТОРЫ НОМЕРА

Бабий Надежда Анатоліевна,

ведущий инженер отдела управления динамическими системами Института космических исследований НАН и ГКА Украины, пр. Академика Глушкова, 40, корпус 4/1, г. Киев, 03680 ГСП, e-mail: nababiy@gmail.com

Богачук Юрий Петрович,

кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела интеллектуального управления Международного научно-учебного центра информационных технологий и систем НАН и МОН Украины, пр. Академика Глушкова, 40, корпус 4/1, г. Киев, 03680 ГСП, e-mail: dep185@irtc.org.ua

Волосов Виктор Викторович,

доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник отдела управления динамическими системами Института космических исследований НАН и ГКА Украины, пр. Академика Глушкова, 40, корпус 4/1, г. Киев, 03680 ГСП, e-mail: wolosov@mail.ru

Галич Сергей Сергеевич,

врач-кардиохирург отделения хирургического лечения ишемической болезни сердца Национального института сердечно-сосудистой хирургии им. Н.М. Амосова, ул. Н. Амосова, 6, г. Киев, Украина, 03110, e-mail: libero.ua@gmail.com

Господарчук Алексей Юрьевич,

младший научный сотрудник отдела интеллектуального управления Международного научно-учебного центра информационных технологий и систем НАН и МОН Украины, пр. Академика Глушкова, 40, корпус 4/1, г. Киев, 03680 ГСП, e-mail: dep185@irtc.org.ua

Григорян Рафик Давидович,

доктор биологических наук, заведующий отделом проблем моделирования и подвижности человеко-машинных систем Института программных систем НАН Украины, пр. Академика Глушкова, 40, корпус 5, г. Киев, 052187, e-mail: rgrgygoryan@gmail.com

Губарев Вячеслав Федорович,

член-корреспондент НАН Украины, доктор технических наук, заведующий отделом управления динамическими системами Института космических исследований НАН и ГКА Украины, пр. Академика Глушкова, 40, корпус 4/1, г. Киев, 03680, e-mail: v.f.gubarev@gmail.com

Гуммель Алексей Викторович,

аспирант отдела управления динамическими системами Института космических исследований НАН Украины, пр. Академика Глушкова, 40, корпус 4/1, г. Киев, 03680, e-mail: ovgumm@gmail.com

Кальниш Валентин Владимирович,

доктор биологических наук, профессор кафедры авиационной, морской медицины и психофизиологии Украинской военно-медицинской академии, г. Киев, ул. Мельникова, 24, 04050, e-mail: kalnysh@mail.ru

Кньшов Геннадий Васильевич,

доктор медицинских наук, профессор, академик АМН Украины, директор Национального института сердечно-сосудистой хирургии им. Н.М. Амосова, ул. Н. Амосова, 6, г. Киев, Украина, 03110.

Копець Мирослав Михайлович,

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры математической физики Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт», пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056, e-mail: optimal201214@yandex.ua

Мельников Сергей Викторович,

кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела интеллектуального управления Международного научно-учебного центра информационных технологий и систем НАН и МОН Украины, пр. Академика Глушкова, 40, корпус 4/1, г. Киев, 03680, e-mail: dep185@irtc.org.ua

Мельничук Сергей Викторович,

аспирант отдела интеллектуального управления Международного научно-учебного центра информационных технологий и систем НАН и МОН Украины, пр. Академика Глушкова, 40, корпус 4/1, г. Киев, 03680, e-mail: sergvik@ukr.net

Настенко Евгений Арнольдович,

доктор биологических наук, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом информационных технологий и математического моделирования физиологических процессов Национального института сердечно-сосудистой хирургии им. Н.М. Амосова, ул. Н. Амосова, 6, г. Киев, Украина, 03110, e-mail: nastenko@inbox.ru
заведующий кафедрой биомедицинской кибернетики Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт», пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056, e-mail: nastenko@inbox.ru

Павлова Светлана Вадимовна,

доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела интеллектуального управления Международного научно-учебного центра информационных технологий и систем НАН и МОН Украины, пр. Академика Глушкова, 40, корпус 4/1, г. Киев, 03680, e-mail: dep185@irtc.org.ua

Руденко Анатолий Викторович,

профессор, член-корреспондент НАН Украины, заведующий отделением хирургического лечения ишемической болезни сердца Национального института сердечно-сосудистой хирургии им. Н.М. Амосова, ул. Н. Амосова, 6, г. Киев, Украина, 03110

Сиромеха Сергей Олегович,

старший научный сотрудник, главный врач Национального института сердечно-сосудистой хирургии им. Н.М. Амосова, ул. Н. Амосова, 6, г. Киев, Украина, 03110

Швец Андрей Владимирович,

кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник, начальник научно-исследовательского отдела психофизиологии человека в особых условиях Научно-исследовательского института проблем военной медицины УВМА, г. Киев, ул. Мельникова, 24, 04050, e-mail: avshvets@mail.ru

Шевченко Владимир Николаевич,

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела управления динамическими системами Института космических исследований НАН и ГКА Украины, Проспект академика Глушкова, 40, корпус 4/1, г. Киев, 03680 ГСП, e-mail: vovan_16@ukr.net

Яковенко Алена Викторовна,

ассистент кафедры биомедицинской кибернетики Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт», пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056, e-mail: yakovenkoalena@ukr.net