

# КИБЕРНЕТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

CYBERNETICS AND COMPUTER ENGINEERING

Выпуск 176

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в 1965 г.

Периодичность: 4 раза в год

КИЕВ 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

### Системы и интеллектуальное управление

<i>Gorbonos S.O., Kogut P.I.</i> On pathological solutions to an optimal boundary control problem for linear parabolic equation with continuous coefficients .....	5
<i>Горбонос С.А., Козут П.И.</i> О патологических решениях одного класса задач оптимального управления для линейного параболического уравнения .....	5
<i>Мельничук С.В.</i> Исследование корректности задач идентификации многомерных систем частотным методом .....	19
<i>Павлов В.В., Шелетуха Ю.М.</i> Внутренние и внешние конфликты в распределенных системах интеллектуального управления .....	34

### Информатика и информационные технологии

<i>Коваленко А.С., Пезенцали А.А., Царенко Е.К.</i> Подготовка медицинских изображений к обработке в больших информационных хранилищах .....	46
<i>Татаринов А.Э.</i> Моделирование скрытых фрагментов полярографической хронопотенциограммы инверсии двух тяжелых металлов .....	54

### Медицинская и биологическая кибернетика

<i>Николов Н.А., Лошицкий П.П., Соляр А.Г.</i> Синхронизация биологических тканей средой с полным перемешиванием как обоснование пространственно-неоднородного поля при электромагнитном облучении опухолей .....	63
<i>Kozak L.M., Lukashenko M.V.</i> Monitoring and correction of students' functional state by the information technology tools .....	74
<i>Козак Л.М., Лукашенко М.В.</i> Мониторинг и коррекция функционального состояния студентов средствами информационных технологий .....	74

<b>Abstracts</b> .....	85
------------------------	----

<b>Авторы номера</b> .....	96
----------------------------	----

УДК 681.5 + 621.391:01

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

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

У журналі надано результати досліджень у галузі теорії та практики інформаційних технологій, складних систем та інтелектуального керування, біологічної та медичної кибернетики.

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

The results of research in the field of theory and practice of information technologies, complex systems and intellectual control and 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:* Гарашенко 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), Navakatkyan Michael, PhD, BSc (Australia).

**Научные разделы:**

**Информатика и информационные технологии**

**Системы и интеллектуальное управление**

**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 №7 от 26.06.2014)  
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: kvf@irtc.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 176

SCIENTIFIC JOURNAL

Founded in 1965

Periodicity: 4 issues per year

KIEV 2014

## TABLE OF CONTENTS

### Systems and Intellectual Control

<i>Gorbonos S.O., Kogut P.I.</i> On Pathological Solutions to an Optimal Boundary Control Problem for Linear Parabolic Equation with Continuous Coefficients.....	5
<i>Melnychuk S.V.</i> Regularity Investigation for Multidimensional System Identification Problem by the Frequency Method.....	19
<i>Pavlov V.V., Shepetukha Yu.M.</i> Internal and External Conflicts in Knowledge-Based Distrubuted Control Systems .....	34

### Informatics and Information Technologies

<i>Kovalenko O.S., Pezentsali A.O., Tsarenko K.K.</i> Preparing Medical Images for Processing in Large Information Storages .....	46
<i>Tatarinov A.E.</i> Modelling of Hidden Fragments Polarographic Inversion Chronopotentiogram of Two Heavy Metals .....	54

### Biological and Medical Cybernetics

<i>Nikolov N.A., Loshitskiy P.P., Solayr A.G.</i> Synchronization of Biological Tissues with Complete Mixing Environment as a Justification for the Spatially Inhomogeneous Electromagnetic Field During Irradiation of Tumors.....	63
<i>Kozak L.M., Lukashenko M.V.</i> Monitoring and Correction of Students' Functional State by the Information Technology Tools.....	74

<b>Abstracts</b> .....	85
------------------------	----

<b>Our authors</b> .....	96
--------------------------	----

# КІБЕРНЕТИКА ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

CYBERNETICS AND COMPUTER ENGINEERING

Випуск 176

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

КИЇВ 2014

## ЗМІСТ

### Системи та інтелектуальне керування

<i>Горбонос С.О., Козут П.І.</i> Про патологічні розв'язки одного класу задач оптимального керування для лінійного параболічного рівняння.....	5
<i>Мельничук С.В.</i> Дослідження коректності задач ідентифікації багатовимірних систем частотним методом .....	19
<i>Павлов В.В., Шелетука Ю.М.</i> Внутрішні та зовнішні конфлікти у розподілених системах інтелектуального управління.....	34

### Інформатика та інформаційні технології

<i>Коваленко О.С., Пезенцалі А.О., Царенко К.К.</i> Підготовка медичних зображень до обробки у великих інформаційних сховищах .....	46
<i>Татарінов О.Е.</i> Моделювання прихованих фрагментів полярографічної хронопотенціограми інверсії двох важких металів .....	54

### Біологічна та медична кібернетика

<i>Ніколов М.О., Лошицький П.П., Соляр О.Г.</i> Синхронізація біологічних тканин середовищем з повним перемішуванням як обґрунтування просторово-неоднорідного поля при електромагнітному опроміненні пухлин.....	63
<i>Козак Л.М., Лукашенко М.В.</i> Моніторинг і корекції функціонального стану студентів засобами інформаційних технологій .....	74

<b>Abstracts</b> .....	85
------------------------	----

<b>Інформація про авторів</b> .....	96
-------------------------------------	----

# Системы и интеллектуальное управление

УДК 517.977.56

## ON PATHOLOGICAL SOLUTIONS TO AN OPTIMAL BOUNDARY CONTROL PROBLEM FOR LINEAR PARABOLIC EQUATION

S.O. Gorbonos, P.I. Kogut

*Dnipropetrovsk National University Oles Honchar*

Изучена задача оптимального управления для линейного параболического уравнения с неограниченными коэффициентами в главной части эллиптического оператора. Особенностью данного уравнения является то, что матрица потока является кососимметрической, а ее коэффициенты принадлежат к пространству  $L^2$ . Показано, что поставленная задача имеет единственное решение, которое нельзя получить, используя  $L^\infty$  аппроксимированных задач.

**Ключевые слова:** параболическое уравнение, оптимальное управление, патологическое решение, неограниченные коэффициенты.

Досліджено задачу оптимального керування для лінійного параболического рівняння з необмеженими коефіцієнтами в головній частині еліптичного оператора. Особливість даного рівняння полягає в тому, що матриця потоку є кососиметричною, а її коефіцієнти належать до простору  $L^2$ . Показано, що поставлена задача керування має єдиний розв'язок, який не можна досягти через границю оптимальних розв'язків для  $L^\infty$  апроксимованих задач.

**Ключові слова:** параболическое уравнение, оптимальное управление, патологическое решение, неограниченные коэффициенты.

### INTRODUCTION

In this paper we deal with the following optimal control problem (OCP) for a linear elliptic equation with unbounded coefficients in the main part of elliptic operator

$$I(u, y) = \|y - y_d\|_{L^2(0, T; H_0^1(\Omega; \Gamma_D))}^2 + \|u - u_d\|_{L^2(0, T; L^2(\Gamma_N))}^2 \rightarrow \inf \quad (1)$$

subject to the constraints

$$y_t - \operatorname{div}(\nabla y + A(x)\nabla y) = f \quad \text{in } (0, T) \times \Omega, \quad (2)$$

$$y(0, \cdot) = y_0 \quad \text{in } \Omega, \quad (3)$$

$$y(\cdot, x) = 0 \quad \text{on } (0, T) \times \Gamma_D, \quad \frac{\partial y(\cdot, x)}{\partial \nu_A} = u \quad \text{on } (0, T) \times \Gamma_N, \quad (4)$$

$$u \in L^2(0, T; L^2(\Gamma_N)) \quad (5)$$

where  $u$  is a control,  $y_d \in L^2(0, T; H_0^1(\Omega))$  and  $u_d \in L^2(0, T; L^2(\Gamma_N))$ ,  $f \in L^2(0, T; H^{-1}(\Omega; \Gamma_D))$  are given distributions,  $A$  is a skew-symmetric square  $L^2$ -matrix.

The characteristic feature of this problem is the fact that the matrix  $A(x) = [a_{ij}]_{i,j=1,\dots,N}$  is skew-symmetric,  $a_{ij}(x) = -a_{ji}(x)$  and belongs to  $L^2$ -space (rather than  $L^\infty$ ). This leads to the existence of elements  $y \in L^2(0, T; H_0^1(\Omega; \Gamma_D))$  such that  $y \notin L^\infty((0, T) \times \Omega)$  and

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^T \int_\Omega (\nabla \varphi_n, A(x) \nabla y)_{R^3} dx dt < 0$$

where  $\varphi \in C^\infty([0, T]; C_0^\infty(\Omega)) \ni \varphi_n \rightarrow y$  strongly in  $L^2(0, T; H_0^1(\Omega; \Gamma_D))$ . As a result, the existence, uniqueness, and variational properties of the weak solution to (2)–(4) usually are drastically different from the corresponding properties of solutions to the parabolic equations with  $L^\infty$ -matrices in coefficients. In most cases, the situation can change dramatically for the matrices  $A$  with unremovable singularity. Typically, in such cases, boundary value problem may admit infinitely many weak solutions which can be divided into two classes: approximable and non-approximable solutions [1–3]. A function  $y = y(u)$  is called an approximable solution to the initial-boundary value problem in (2)–(4) if it can be attained by weak solutions to the similar boundary value problems with  $L^\infty$ -approximated matrix  $A$ . However, this type of solutions does not exhaust all weak solutions to the above problem. There is another type of weak solutions, which cannot be approximated by weak solutions of such regularized problems. Usually, such solutions are called non-variational [2–4], singular [5–7], pathological [8, 9], etc.

**The purpose** of this work is to consider OCP (1)–(5) with a well prescribed skew-symmetric  $L^2$ -matrix  $A$  and, using the direct method in the Calculus of variations, to show that this problem admits a unique solution possessing a special singular properties. As a result, we prove that this solution cannot be attained through a sequence of optimal solutions to regularized OCP for boundary value problem (23)–(24) with skew-symmetric matrices  $A_k \in L^\infty(\Omega, S^3)$  such that  $A_k \rightarrow A$  strongly in  $L^2(\Omega, S^3)$ . Thus, this result shows that a numerical analysis of optimal control problems for parabolic equations with unbounded coefficients is a non-trivial matter and it requires the elaboration of special approaches.

## NOTATION AND PRELIMINARIES

Let  $\Omega$  be the unit ball in  $R^3$ ,  $\Omega = \{x \in R^3 : \|x\|_{R^3} < 1\}$ . Let  $C_0^\infty(\Omega; \Gamma_D)$  be the set of all infinitely differentiable functions  $\varphi : \Omega \rightarrow R$  with compact supports in  $\Omega$ . Let  $C_0^\infty(\Omega; \Gamma_D) = \{\varphi \in C_0^\infty(R^N) : \varphi = 0 \text{ on } \Gamma_D\}$ . We define the Banach space  $H_0^1(\Omega; \Gamma_D)$  as the closure of  $C_0^\infty(\Omega; \Gamma_D)$  with respect to the norm (see [10])

$$\|y\|_{H_0^1(\Omega;\Gamma_D)} = \left( \int_{\Omega} \|\nabla y\|_{R^3}^2 dx \right)^{1/2}.$$

Let  $H^{-1}(\Omega;\Gamma_D)$  be the dual space to  $H_0^1(\Omega;\Gamma_D)$ . Let  $X$  be a Banach space and let  $T > 0$  be a given value. We denote by  $L^2(0,T;X)$  the set of measurable functions  $y \in (0,T) \rightarrow X$  such that  $\|u(\cdot)\|_X \in L(0,T)$ . Similarly, one can also define the set of distributions  $D'(0,T;X)$  on  $(0,T)$  with values in  $X$ .  $L^2(0,T;X)$  is a Banach space with respect to the norm

$$\|y\|_{L^2(0,T;X)} = \left( \int_{\Omega} \|u(x)\|_X^2 dx \right)^{1/2}.$$

If  $X$  is reflexive, the space  $L^2(0,T;X)$  is reflexive, too. Moreover, if  $X$  is separable, then  $L^2(0,T;X)$  is separable. Let  $C([0,T];L^2(\Omega))$  be the space of measurable functions on  $[0,T] \times \Omega$  such that  $y(t,\cdot) \in L^2(\Omega)$  for any  $t \in [0,T]$  and such that the map  $t \in [0,T] \mapsto y(t,\cdot) \in L^2(\Omega)$  is continuous. Let us define the Banach space

$$W_{\Gamma_D} = \left\{ y: y \in L^2(0,T;H_0^1(\Omega;\Gamma_D)), \frac{\partial y}{\partial t} \in L^2(0,T;H^{-1}(\Omega;\Gamma_D)) \right\}$$

equipped with the norm of the graph. Here, the derivative  $\partial y / \partial t$  is the distribution in  $D'(0,T;H^{-1}(\Omega;\Gamma_D))$ . Then the following properties holds true (see [11, 12]).

- Theorem 1.**
- 1) The embedding  $W_{\Gamma_D} \subset L^2(0,T;L^2(\Omega))$  is compact.
  - 2) One has the embedding  $W_{\Gamma_D} \subset C([0,T];L^2(\Omega))$ .
  - 3) For any  $u, v \in W_{\Gamma_D}$ , one has

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \int_{\Omega} u(t,x)v(t,x) dx = \\ & = \left\langle u'(t,\cdot), v(t,\cdot) \right\rangle_{H^{-1}(\Omega;\Gamma_D), H_0^1(\Omega;\Gamma_D)} + \left\langle v'(t,\cdot), u(t,\cdot) \right\rangle_{H^{-1}(\Omega;\Gamma_D), H_0^1(\Omega;\Gamma_D)}. \end{aligned}$$

Let  $y \in L^2(0,T;H_0^1(\Omega;\Gamma_D)) \cap C([0,T];L^2(\Omega))$ . Then the following density result holds: there exists  $\Phi \in C^\infty([0,T];C_0^\infty(\Omega;\Gamma_D))$  such that

$$\|y - \Phi\|_{C([0,T];L^2(\Omega))} \leq \delta, \quad \|\nabla y - \nabla \Phi\|_{L^2(0,T;L^2(\Omega))} \leq \delta, \quad \forall \delta > 0.$$

**Skew-symmetric matrices.** Let  $S^3$  be the set of all skew-symmetric matrices  $A(x) = [a_{ij}]_{i,j=1}^3$ , i.e.  $A$  is a square matrix with  $a_{ij} = -a_{ji}$  and, hence,  $a_{ii} = 0$ . Therefore, the set  $S^3$  can be identified with the Euclidean space  $R^3$ .

Let  $L^2(\Omega; S^3)$  be the space of measurable square-integrable functions whose values are skew-symmetric matrices and it is endowed with the norm

$$\|A\|_{L^2(\Omega; S^3)} = \left( \int_{\Omega} \|A(x)\|_{S^3}^2 dx \right)^{1/2}.$$

In what follows, we associate with matrix  $A \in L^2(\Omega; S^3)$  the bilinear form  $\varphi(\cdot, \cdot)_A : L^2(0, T; C_0^1(\Omega)) \times L^2(0, T; C_0^1(\Omega)) \rightarrow R$  following the rule

$$\varphi(y, v)_A = \int_0^T \int_{\Omega} (\nabla v, A(x) \nabla y)_{R^3} dx dt, \quad \forall y, v \in L^2(0, T; C_0^1(\Omega)).$$

It is easy to see that this form is unbounded on  $L^2(0, T; H_0^1(\Omega))$ , since, in general, the 'integrand'  $(\nabla v, A(x) \nabla y)_{R^3}$  is not integrable on  $(0, T) \times \Omega$ . This motivates an introduction of the following set. We say that a distribution  $y \in L^2(0, T; H_0^1(\Omega; \Gamma_D))$  belongs to the set  $D(A)$  if

$$\left| \int_0^T \int_{\Omega} (\nabla \varphi, A(x) \nabla y)_{R^3} dx dt \right| \leq c(y, A) \left( \int_0^T \int_{\Omega} \|\nabla \varphi\|_{R^3}^2 dx dt \right)^{1/2},$$

for all  $\varphi \in C^\infty([0, T]; C_0^\infty(\Omega; \Gamma_D))$ , with some constant  $c$  depending on  $y$  and  $A$ . As a result, having set

$$[y, \varphi] = \int_0^T \int_{\Omega} (\nabla \varphi, A(x) \nabla y)_{R^3} dx dt, \quad \forall y \in D, \forall \varphi \in C^\infty([0, T]; C_0^\infty(\Omega)), \quad (6)$$

we observe that the bilinear form  $[y, \varphi]$  can be defined for all  $\varphi \in L^2(0, T; H_0^1(\Omega; \Gamma_D))$  using the standard rule

$$[y, \varphi] = \lim_{\varepsilon \rightarrow \infty} [y, \varphi_\varepsilon] \quad (7)$$

where  $\{\varphi_\varepsilon\}_{\varepsilon > 0} \in C^\infty([0, T]; C_0^\infty(\Omega; \Gamma_D))$  and  $\varphi_\varepsilon \rightarrow \varphi$  converges strongly in  $L^2(0, T; H_0^1(\Omega; \Gamma_D))$ . In this case the value  $[y, \varphi]$  is finite for every  $y \in D(A)$ , although the 'integrand'  $(\nabla \varphi, A(x) \nabla y)_{R^3}$  need not be integrable on  $(0, T) \times \Omega$ , in general. This fact leads us to the conclusion

$$[y, y] < +\infty, \quad \forall y \in D(A).$$

At the same time, if we temporary assume that  $A \in L^\infty(\Omega; S^3)$ , then the bilinear form  $[y, \varphi]$  is obviously bounded on  $L^2(0, T; H_0^1(\Omega; \Gamma_D))$ , i.e. in this case  $D(A) \equiv L^2(0, T; H_0^1(\Omega; \Gamma_D))$ . Indeed, in view of the Bunjakowski inequality, we get



$$\begin{aligned} [y, v] &\leq \|A\|_{L^\infty(\Omega, S^3)} \int_0^T \int_\Omega \|\nabla y\|_{R^3} \|\nabla v\|_{R^3} dx dt \leq \\ &\leq \|A\|_{L^\infty(\Omega, S^3)} \|y\|_{L^2(0, T; H_0^1(\Omega; \Gamma_D))} \|v\|_{L^2(0, T; H_0^1(\Omega; \Gamma_D))}. \end{aligned}$$

Moreover, if  $y = v$  then  $[y, y] = -[y, y]$ , and, therefore,  $[y, y] = 0$  for all  $y \in L^2(0, T; H_0^1(\Omega; \Gamma_D))$ . However, as it is shown in the next section, there exist skew-symmetric  $L^2$ -matrices  $A$  such that the equality  $[y, y] = [y, y]$  does not hold true for some  $y \in D(A)$ .

We define the divergence  $\operatorname{div} A$  of a skew-symmetric matrix  $A \in L^2(\Omega; S^3)$  as a vector-valued distribution  $d \in H^{-1}(\Omega; R^3)$  by the following rule

$$\langle d_i, \varphi \rangle_{H^{-1}(\Omega), H_0^1(\Omega)} = - \int_\Omega (a_i, \nabla \varphi)_{R^3} dx, \quad \forall \varphi \in C_0^\infty(\Omega)$$

where  $a_i$  stands for the  $i$ -th row of the matrix  $A$ . We say that a matrix  $A \in L^2(\Omega; S^3)$  belongs to the space  $H(\Omega; \operatorname{div}; S^3)$  if  $d := \operatorname{div} A \in L^1(\Omega; R^3)$ , that is

$$H(\Omega; \operatorname{div}; S^3) = \left\{ A \mid A \in L^2(\Omega; S^3), \operatorname{div} A \in L^1(\Omega; R^3) \right\}.$$

#### MOTIVATING EXAMPLE

Our main intention in this section is to show that for a given positive scalar value  $\alpha \in R$  there exist a skew-symmetric matrix  $A \in L^2(\Omega; S^3)$  and a function  $y_d \in L^2(0, T; H_0^1(\Omega))$  such that

$$y_d \in D(A) \text{ and } [y_d, y_d] = -\alpha < 0$$

where the bilinear form  $[y, v]$  is defined by (6). We divide our analysis into several steps.

Step 1. We define a skew-symmetric matrix  $A$  as follows

$$A(x) = \begin{pmatrix} 0 & a(x) & 0 \\ -a(x) & 0 & -b(x) \\ 0 & b(x) & 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

where  $a(x) = \frac{x_1}{2\|x\|_{R^3}^2}$  and  $b(x) = \frac{x_3}{2\|x\|_{R^3}^2}$ . Since

$$\|a(x)\|_{L^2(\Omega)}^2 = \int_\Omega \left( \frac{x_1}{2\|x\|_{R^3}^2} \right)^2 dx = \int_0^1 \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{\rho^2 \cos^2 \varphi \sin^2 \psi}{4\rho^4} \rho^2 \sin \psi \, d\psi \, d\varphi \, d\rho < +\infty,$$

it follows that  $a \in L^2(\Omega)$ . By analogy, it can be shown that  $b \in L^2(\Omega)$ . Moreover, it is easy to see that the skew-symmetric matrix  $A$ , we define by (8), satisfies the property  $A \in H(\Omega; \operatorname{div}; S^3)$ , i.e.  $A \in L^2(\Omega; S^3)$  and  $\operatorname{div} A \in L^1(\Omega; R^3)$ . Indeed, in

view of the definition of the divergence  $\operatorname{div} A$  of a skew-symmetric matrix, we

have  $\operatorname{div} A = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix}$ , where  $d_i = \operatorname{div} a_i = \frac{x_i x_2}{\|x\|_{R^3}^4}$  and  $a_i$  is  $i$ -th column of  $A$ . As a

result, we get

$$\|\operatorname{div} a_i\|_{L^1(\Omega)} = \int_0^1 \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \left| \frac{\rho^2 f_i(\varphi, \psi) \sin \varphi \sin \psi}{\rho^4} \right| \rho^2 \sin \psi \, d\psi \, d\varphi \, d\rho < +\infty,$$

for the corresponding  $f_i = f_i(\varphi, \psi)$   $i = 1, 2, 3$ . Therefore,  $\operatorname{div} A \in L^1(\Omega; R^3)$ .

Step 2 deals with the choice of the function  $y_d \in L^2(0, T; H_0^1(\Omega))$ . We define it by the rule

$$y_d(t, x) = t \sqrt{\frac{52\alpha}{\pi T^3 (1 - \exp(-2\pi))}} \left(1 - \|x\|_{R^3}^5\right) \frac{x_2^2}{x_1^2 + x_2^2} \exp\left(-\frac{\pi}{2} - \arctan \frac{\sqrt{x_1^2 + x_2^2} - x_1}{x_2}\right), \quad (9)$$

for all  $(t, x) \in (0, T) \times \Omega$ . It is easy to see that

$$\begin{aligned} v_0\left(\frac{x}{\|x\|_{R^3}}\right) &= \sqrt{\frac{52\alpha}{\pi T^3 (1 - \exp(-2\pi))}} \frac{x_2^2}{x_1^2 + x_2^2} \exp\left(-\frac{\pi}{2} - \arctan \frac{\sqrt{x_1^2 + x_2^2} - x_1}{x_2}\right) \\ &= \sqrt{\frac{52\alpha}{\pi T^3 (1 - \exp(-2\pi))}} \sin^2 \varphi \exp(-\varphi/2), \quad \forall \varphi \in [0, 2\pi] \end{aligned}$$

with respect to the spherical coordinates. Hence,  $v_0 \in C^1(\partial\Omega)$ , and, as immediately follows from (9), it provides that

$$y_d \in L^2(0, T; L^2(\Omega)) \text{ and } y_d(t, \cdot) = 0 \text{ on } \partial\Omega \quad \forall t \in [0, T]. \quad (10)$$

By direct computations, we get

$$v_0\left(\frac{x}{\|x\|_{R^3}}\right) = \frac{1}{\|x\|_{R^3}^3} \begin{bmatrix} \frac{\partial v_0}{\partial z_1} (\|x\|_{R^3}^2 - x_1^2) - \frac{\partial v_0}{\partial z_2} x_1 x_2 \\ \frac{\partial v_0}{\partial z_2} (\|x\|_{R^3}^2 - x_2^2) - \frac{\partial v_0}{\partial z_1} x_1 x_2 \\ - \frac{\partial v_0}{\partial z_1} x_1 x_3 - \frac{\partial v_0}{\partial z_2} x_2 x_3 \end{bmatrix}, \quad \forall x \neq 0. \quad (11)$$

Hence, there exists a constant  $C^* > 0$  such that  $\left\| \nabla v_0\left(\frac{x}{\|x\|_{R^3}}\right) \right\|_{R^3} \leq \frac{C^*}{\|x\|_{R^3}}$ .

Thus,

$$\|\nabla y_d\|_{R^3} \leq t \left\| \nu_0 \left( \frac{x}{\|x\|_{R^3}} \right) \right\| \left\| \nabla \left( 1 - \|x\|_{R^3}^5 \right) \right\|_{R^3} + t \left( 1 - \|x\|_{R^3}^5 \right) \left\| \nabla \nu_0 \left( \frac{x}{\|x\|_{R^3}} \right) \right\| \leq C_1 + \frac{C_2}{\|x\|_{R^3}}.$$

As a result, we infer that  $\nabla y_d \in L^2(0, T; L^2(\Omega; R^3))$ , i.e. we finally have  $y_d \in L^2(0, T; H_0^1(\Omega))$ .

Step 3. We show that the function  $y_d$ , which was introduced before, belongs to the set  $D(A)$ . To do so, we have to prove the estimate

$$\left| \int_0^T \int_{\Omega} (\nabla \varphi, A(x) \nabla y_d)_{R^3} dx dt \right| \leq \tilde{C} \left( \int_0^T \int_{\Omega} |\nabla \varphi|_{R^3}^2 dx dt \right)^{1/2},$$

for all  $\varphi \in C^\infty([0, T]; C_0^\infty(\Omega))$ .

To this end, we make use of the following transformations

$$\begin{aligned} \int_0^T \int_{\Omega} (\nabla \varphi, A \nabla \psi)_{R^3} dx dt &= - \int_0^T \langle \operatorname{div}(A \nabla \psi), \varphi \rangle_{H^{-1}(\Omega); H_0^1(\Omega)} dt = \\ &= \int_0^T \left\langle \operatorname{div} \begin{bmatrix} (a_1)^t \nabla \psi \\ (a_2)^t \nabla \psi \\ (a_3)^t \nabla \psi \end{bmatrix}, \varphi \right\rangle_{H^{-1}(\Omega); H_0^1(\Omega)} dt = \\ &= \int_0^T \sum_{i=1}^3 \left\langle \operatorname{div} a_i, \varphi \frac{\partial \psi}{\partial x_i} \right\rangle_{H^{-1}(\Omega); H_0^1(\Omega)} dt + \underbrace{\int_0^T \int_{\Omega} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \left( a_{ij} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_i \partial x_j} \right) dx dt}_{=0} \\ &\quad \text{since } A \in L^2(\Omega; S^3) \\ &= \int_0^T \int_{\Omega} (\operatorname{div} A, \nabla \psi)_{R^3} \varphi dx dt \end{aligned}$$

due to the fact that  $\operatorname{div} A \in L^1(\Omega; R^3)$ , which are obviously true for all  $\psi, \varphi \in C^\infty([0, T]; C_0^\infty(\Omega))$ . Since

$$\begin{aligned} \left| \int_0^T \int_{\Omega} (\operatorname{div} A, \nabla \psi)_{R^3} \varphi dx dt \right| &= \left| \int_0^T \int_{\Omega} (\nabla \varphi, A \nabla \psi)_{R^3} dx dt \right| \leq \\ &\leq C \|A\|_{L^2(\Omega; S_{skew}^3)} \|\psi\|_{L^2(0, T; H_0^1(\Omega))}, \end{aligned}$$

it follows that, using the continuation principle, we can extend the previous equality with respect to  $\psi$  to the following one

$$\int_0^T \int_{\Omega} (\nabla \varphi, A \nabla y_d)_{R^3} dx dt = \int_0^T \int_{\Omega} \varphi (\operatorname{div} A, \nabla y_d)_{R^3} dx dt, \quad \forall \varphi \in C^\infty([0, T]; C_0^\infty(\Omega)). \quad (12)$$

Let us show that  $(\operatorname{div} A, \nabla y_d)_{R^3} \in L^\infty((0, T) \times \Omega)$ . In this case, relation (12) implies the estimate

$$\begin{aligned} \left| \int_0^T \int_{\Omega} (\nabla \varphi, A \nabla y_d)_{R^3} dx dt \right| &\leq \|(\operatorname{div} A, \nabla y_d)_{R^3}\|_{L^\infty((0,T) \times \Omega)} \int_0^T \int_{\Omega} |\varphi| dx dt \leq \\ &\leq \tilde{C} \left( \int_0^T \int_{\Omega} |\nabla \varphi|_{R^N}^2 dx dt \right)^{1/2}, \end{aligned} \quad (13)$$

for all  $\varphi \in C^\infty([0, T]; C_0^\infty(\Omega))$ , which means that the element  $y_d$  belongs to the set  $D(A)$ .

Indeed, as follows from (11), we have the equality

$$\left( \nabla v_0 \left( \frac{x}{\|x\|_{R^3}}, \frac{x}{\|x\|_{R^3}^3} \right) \right)_{R^3} = 0. \quad (14)$$

Thus, the gradient of the function  $\nabla v_0 \left( \frac{x}{\|x\|_{R^3}} \right)$  is orthogonal to the vector field  $Q = \frac{x}{\|x\|_{R^3}^3}$  outside the origin. Therefore,

$$\begin{aligned} (\nabla y_d, \operatorname{div} A)_{R^3} &:= t \left( \nabla \left[ \left( 1 - \|x\|_{R^3}^5 \right) v_0 \left( \frac{x}{\|x\|_{R^3}} \right), \frac{x}{\|x\|_{R^3}^3} \frac{x_2}{\|x\|_{R^3}^3} \right]_{R^3} \right) = \\ &= t \left( \nabla \left( 1 - \|x\|_{R^3}^5 \right), \frac{x}{\|x\|_{R^3}^3} \right)_{R^3} \times v_0 \left( \frac{x}{\|x\|_{R^3}} \right) \frac{x_2}{\|x\|_{R^3}^3} + \\ &+ t \left( 1 - \|x\|_{R^3}^5 \right) \left( \nabla v_0 \left( \frac{x}{\|x\|_{R^3}} \right), \frac{x}{\|x\|_{R^3}^3} \right)_{R^3} \frac{x_2}{\|x\|_{R^3}^3} = I_1 + I_2 \end{aligned}$$

where  $I_2 = 0$  by (14). Since  $\nabla \left( 1 - \|x\|_{R^3}^5 \right) = -5 \|x\|_{R^3}^3 x$ ,  $\frac{x_2}{\|x\|_{R^3}^3} = \sin \varphi \sin \psi$  with respect to the spherical coordinates, and function  $v_0$  is smooth, it follows that there exists a constant  $C_0 > 0$  such that  $|(\nabla y_d, \operatorname{div} A)_{R^3}| \leq C_0$  almost everywhere in  $(0, T) \times \Omega$ . Thus,

$$(\operatorname{div} A, \nabla y_d)_{R^3} \in L^\infty((0, T) \times \Omega)$$

and we have obtained the required property.

Step 4. Using results of the previous steps, we show that the function  $y_d$  satisfies the condition  $[y_d, y_d] = -\alpha < 0$ . Indeed,  $\{\varphi_\varepsilon\}_{\varepsilon \rightarrow 0} \in C^\infty([0, T]; C_0^\infty(\Omega))$  be a sequence such that

$$\varphi_\varepsilon \rightarrow y_d \text{ strongly in } L^2(0, T; H_0^1(\Omega)). \quad (15)$$

Then by continuity, we have

$$[y_d, y_d] = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_0^T \int_{0\Omega} (\nabla \varphi_\varepsilon, A \nabla y_d)_{R^3} dx dt \stackrel{by(12)}{=} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_0^T \int_{0\Omega} \varphi_\varepsilon (\operatorname{div} A, \nabla y_d)_{R^3} dx dt .$$

Since  $(\operatorname{div} A, \nabla y_d)_{R^3} \in L^\infty((0, T) \times \Omega)$ , in view of the property (15), we can pass to the limit in the right-hand side of this relation. As a result, we get

$$[y_d, y_d] = \int_0^T \int_{0\Omega} y_d (\operatorname{div} A, \nabla y_d)_{R^3} dx dt = \frac{1}{2} \int_0^T \int_{0\Omega} (\operatorname{div} A, \nabla y_d^2)_{R^3} dx dt . \quad (16)$$

Let  $\Omega_\varepsilon = \{x \in R^3 \mid \varepsilon < \|x\|_{R^3} < 1\}$  and let  $\Gamma_\varepsilon = \{\|x\|_{R^3} = \varepsilon\}$  be the sphere of radius  $\varepsilon$  centered at the origin. Then

$$\begin{aligned} \int_{0\Omega_\varepsilon} (\operatorname{div} A, \nabla y_d^2)_{R^3} dx dt &= \int_0^T \int_{\Gamma_\varepsilon} (\operatorname{div} A, \nu)_{R^3} y_d^2 dH^2 dt = \\ &= \int_0^T \left[ \int_{\Gamma_\varepsilon} (\operatorname{div} A, \nu)_{R^3} \left(1 - \|x\|_{R^3}^5\right) v_0^2 \left(\frac{x}{\|x\|_{R^3}}\right) dH^2 \right] t^2 dt = \\ &= \frac{T^3}{3} \int_{\Gamma_\varepsilon} (\operatorname{div} A, \nu)_{R^3} v_0^2 \left(\frac{x}{\|x\|_{R^3}}\right) dH^2 + o(1) = \\ &= \frac{T^3}{3} \int_{\Gamma_\varepsilon} \left( \frac{x}{\|x\|_{R^3}}, \left( -\frac{x}{\|x\|_{R^3}} \right) \right)_{R^3} \frac{x_2}{\|x\|_{R^3}} v_0^2 \left(\frac{x}{\|x\|_{R^3}}\right) dH^2 + o(1) \\ &= -\frac{T^3}{3\varepsilon^2} \int_{\Gamma_\varepsilon} \frac{x_2}{\|x\|_{R^3}} v_0^2 \left(\frac{x}{\|x\|_{R^3}}\right) dH^2 + o(1) = -\frac{T^3}{3} \int_\Gamma b_0(x) v_0^2(x) dH^2 + o(1) \end{aligned} \quad (17)$$

where  $b_0 = \sin \varphi \sin \psi$  and  $v_0^2 = \frac{52\alpha}{\pi T^3 (1 - \exp(-2\pi))} \sin^4 \varphi \exp(-\varphi)$ . Since

$$\int_{\partial\Omega} b_0 v_0^2 dH^2 = \frac{52\alpha}{\pi T^3 (1 - \exp(-2\pi))} \left( \int_0^{2\pi} \sin^5 \varphi e^{-\varphi} d\varphi \int_0^{2\pi} \sin^2 \psi d\psi \right) = 6\alpha T^{-3} > 0 ,$$

it remains to combine this result with (16), (17), and relation

$$\int_0^T \int_{0\Omega} (\operatorname{div} A, \nabla y_d^2)_{R^3} dx dt = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_0^T \int_{0\Omega_\varepsilon} (\operatorname{div} A, \nabla y_d^2)_{R^3} dx dt .$$

As a result, we finally infer  $[y_d, y_d] = -\alpha < 0$ .

## SETTING OF THE OPTIMAL CONTROL PROBLEM AND ITS PRELIMINARY ANALYSIS

Let  $\Omega$  be the unit ball in  $R^3$ . We assume that its boundary  $\Gamma = \{\|x\|_{R^3} = 1\}$  is divided into two disjoint parts  $\partial\Omega = \Gamma_D \cup \Gamma_N$ . Let the sets  $\Gamma_D$  and  $\Gamma_N$  have positive 2-dimensional measures.

Let  $f \in L^2(0, T; H^{-1}(\Omega; \Gamma_D))$  and  $y_0 \in L^2(\Omega)$  be given distributions, let  $A \in L^2(\Omega; S^3)$  and  $y_d \in L^2(0, T; H_0^1(\Omega))$  be defined by (8) and (9), respectively. The optimal control problem we consider in this paper is to minimize the discrepancy (tracking error) between a given distribution  $y_d \in L^2(0, T; H_0^1(\Omega))$  and a solution  $y$  of the Neumann-Dirichlet boundary value problem for parabolic equation (2)–(4) by choosing an appropriate boundary control  $u \in L^2(0, T; L^2(\Gamma_N))$  where

$$\frac{\partial y}{\partial \nu_A} = \sum_{i,j=1}^3 (\delta_{ij} + a_{ij}(x)) \frac{\partial y}{\partial x_j} \cos(\nu, x_i),$$

$\delta_{ij}$  is the Kronecker's delta,  $\cos(\nu, x_i)$  is the  $i$ -th directing cosine of  $\nu$ , and  $\nu$  is the outward unit normal vector at  $\Gamma_N$  to the ball  $\Omega$ .

More precisely, we are concerned with OCP (1)–(5). The distinguishing feature of this problem is the special choice of matrix  $A$  and distribution  $f$ . As we will see later on, this entails a number of pathologies with respect to the standard properties of optimal control problems for parabolic equation. In particular, this leads to the non-uniqueness of weak solutions to the corresponding initial boundary value problem and a singular properties of an optimal pair. As a result, numerical approximation of the solution to OCP (1)–(5) is getting non-trivial.

To begin with, we introduce the following notion.

**Definition 1.** We say that  $(u, y)$  is an admissible pair to OCP (1)–(5) if  $u \in L^2(0, T; L^2(\Gamma_N))$ ,  $y \in W$ ,

$$y(0, \cdot) = y_0 \in L^2(\Omega) \text{ almost everywhere in } \Omega, \quad (18)$$

and the integral identity

$$\begin{aligned} & \int_0^T \int_{\Omega} y_t \varphi dx dt + \int_0^T \int_{\Omega} (\nabla \varphi, \nabla y + A(x) \nabla y)_{R^N} dx dt = \\ & = \int_0^T \langle f, \varphi \rangle_{H^{-1}(\Omega; \Gamma_D); H_0^1(\Omega; \Gamma_D)} dt + \int_0^T \int_{\Gamma_N} u \varphi dH^2 dt \end{aligned} \quad (19)$$

holds true for each  $\varphi \in C^\infty([0, T]; C_0^\infty(\Omega; \Gamma_N))$ .

We denote by  $\Xi$  the set of all admissible pairs for the OCP (1)–(5).

It is worth to note that in view of definition of the space  $W$  and Theorem 1, the condition (18) has a sense. Moreover, as was shown in [13], if  $(u, y)$  is an admissible pair, then  $y \in D(A)$ .

**Definition 2.** We say that OCP (1)–(5) is regular if it admits at least one admissible pair, i.e.  $\Xi \neq \emptyset$ .

We also say that a pair  $(u^0, y^0) \in L^2(0, T; L^2(\Gamma_N)) \times D(A)$  is optimal for problem (1)–(5) if

$$(u^0, y^0) \in \Xi \text{ and } I(u^0, y^0) = \inf_{(u, y) \in \Xi} I(u, y).$$

As immediately follows from (19) and the definition of bilinear form  $[y, \varphi]$  (see also the extension rule (7)), every admissible pair  $(u, y) \in \Xi$  is related by the following energy equality

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \int_0^T \int_{\Omega} (y^2)_t \varphi \, dx dt + \|y\|_{L^2(0, T; H_0^1(\Omega; \Gamma_D))}^2 + [y, y] = \\ & = \int_0^T \langle f, \varphi \rangle_{H^{-1}(\Omega; \Gamma_D); H_0^1(\Omega; \Gamma_D)} dt + \int_0^T \int_{\Gamma_N} u \varphi dH^2 dt. \end{aligned} \quad (20)$$

However, as was shown in previous section, the value  $[y, y]$  is not of constant sign on  $D(A)$ . Hence, energy equality (20) does not allow us to derive any priori estimate for the admissible solutions. In spite of this, the following result proves that OCP (1)–(5) is well-posed under the special choice of distributions  $y_d \in L^2(0, T; H_0^1(\Omega))$ ,  $u_d \in L^2(0, T; L^2(\Gamma_N))$ ,  $y_0 \in L^2(\Omega)$ , and  $f \in L^2(0, T; H^{-1}(\Omega))$ .

**Theorem 2.** Let  $A \in L^2(\Omega; S^3)$  and  $y_d \in L^2(0, T; H_0^1(\Omega))$  be defined by (8) and (9), respectively. Assume that  $y_0 \equiv 0$  in  $\Omega$  and distributions  $f \in L^2(0, T; H^{-1}(\Omega))$  and  $u_d \in L^2(0, T; L^2(\Gamma_N))$  are given by the rule

$$f := (y_d)_t - \operatorname{div}(\nabla y_d + A \nabla y_d), \quad (21)$$

$$u_d := \gamma_{\Gamma_N}^1(y_d) \quad (22)$$

where

$$\gamma_{\Gamma_N}^1 : L^2(0, T; H_0^1(\Omega; \Gamma_D)) \rightarrow L^2(0, T; H^{-1/2}(\Gamma_N))$$

is the trace operator such that

$$\gamma_{\Gamma_N}^1(y) = \frac{\partial y}{\partial \nu_A} \Big|_{\Gamma_N} := \sum_{i, l=1}^3 (\delta_{ij} + a_{ij}(x)) \frac{\partial y}{\partial x_j} \cos(\nu, x_i)$$

provided  $y \in L^2(0, T; H_0^1(\Omega; \Gamma_D)) \cap L^2(0, T; C^1(\overline{\Omega}))$ .

Then the pair

$$(u^0, y^0) := (u_d, y_d) \in L^2(0, T; L^2(\Gamma_N)) \times D(A)$$

is a unique solution to OCP (1)–(5).

*Proof.* As follows from (9), the function  $y_d$  is smooth near the boundary  $\partial\Omega$  and  $(y_d)_t \in L^2(0, T; H_0^1(\Omega))$ . Hence,  $u_d := \gamma_{\Gamma_N}^1(y_d) \in L^2(\Gamma_N)$  and  $y_d \in W$  (see (10)). Moreover, the inclusion  $y \in D(A)$  (see estimate (13)) implies:

$$\operatorname{div}(A \nabla y_d) \in L^2(0, T; H^{-1}(\Omega)).$$

Therefore, in view of the inclusion  $(y_d)_t \in L^2(0, T; H_0^1(\Omega))$ , we have  $f \in L^2(0, T; H^{-1}(\Omega))$ . Since  $y_d(0, \cdot) = 0$  in  $\Omega$  and

$$\int_0^T \langle f, \varphi \rangle_{H^{-1}(\Omega; \Gamma_D); H_0^1(\Omega; \Gamma_D)} dt = \int_0^T \int_{\Omega} (y_d)_t \varphi dx dt + \int_0^T \int_{\Omega} (\nabla \varphi, \nabla y_d + A(x) \nabla y_d)_{R^N} dx dt - \int_0^T \int_{\Gamma_N} \gamma_{\Gamma_N}^1(y_d) \varphi dH^2 dt$$

for all  $\varphi \in C^\infty([0, T]; C_0^\infty(\Omega; \Gamma_D))$ , it follows that the pair  $(u_d, y_d)$  satisfies relations (18)–(19). Thus,  $(u_d, y_d)$  is an admissible solution to OCP (1)–(5) in the sense of Definition 2. To conclude the proof, it is enough to note that

$$I(u, y) \geq 0 \quad \forall (u, y) \in \Xi, \quad I(u_d, y_d) = 0,$$

and the cost functional  $I: \Xi \rightarrow R$  is strictly convex.

### ON GAP IN ATTAINABILITY OF AN OPTIMAL PAIR

The question we are going to discuss in this section is about some pathological properties that can be inherited by optimal pair to the problem, (1)–(5) provided the skew-symmetric matrix is given by the rule (8). Since  $A \in L^2(\Omega; S^3)$ , it follows that there exists a sequence of skew-symmetric matrices  $\{A_k\}_{k \in N} \in L^\infty(\Omega; S^3)$  such that  $A_k \rightarrow A$  strongly in  $L^2(\Omega; S^3)$ . Hence, it is reasonably, from numerical point of view, to consider the following sequence of constrained minimization problems associated with matrices  $A_k$ .

$$\left\{ \left\langle \inf_{(u, y) \in \Xi_k} I_k(u, y) \right\rangle, k \rightarrow \infty \right\}. \quad (23)$$

Here,

$$I_k(u, y) := I(u, y) \quad \forall (u, y) \in L^2(0, T; L^2(\Gamma_N)) \times L^2(0, T; H_0^1(\Omega; \Gamma_D)), \quad \forall k \in N, \quad (24)$$

and  $(u, y) \in \Xi_k$  if and only if

$$\left\{ \begin{array}{l} y_t - \operatorname{div}(\nabla y + A_k \nabla y) = f \text{ in } (0, T) \times \Omega, \\ y(0, \cdot) = y_0 \text{ in } \Omega, \\ y(\cdot, x) = 0 \text{ on } (0, T) \times \Gamma_D, \quad \frac{\partial y(\cdot, x)}{\partial \nu_{A_k}} = u \text{ on } (0, T) \times \Gamma_N, \\ u \in L^2(0, T; L^2(\Gamma_N)), \quad y \in L^2(0, T; H_0^1(\Omega; \Gamma_D)), \\ y_t \in L^2(0, T; H^{-1}(\Omega; \Gamma_D)). \end{array} \right. \quad (25)$$

**Theorem 3.** Let  $u_d \in L^2(0, T; L^2(\Gamma_N))$ ,  $f \in L^2(0, T; H^{-1}(\Omega; \Gamma_D))$ ,  $y_0 \in L^2(\Omega)$ , and  $y_d \in L^2(0, T; H_0^1(\Omega; \Gamma_D))$  be given distributions. Then for every



$k \in N$  there exists a unique minimizer  $(u_k^0, y_k^0) \in \Xi_k$  to the corresponding constrained minimization problem (23) such that the sequence of optimal pairs  $\{(u_k^0, y_k^0) \in \Xi_k\}_{k \in N}$  is relatively compact with to the product of the weak topologies on

$$L^2(0, T; L^2(\Gamma_N)) \times L^2(0, T; H_0^1(\Omega; \Gamma_D))$$

and each of its cluster pairs  $(u^*, y^*)$  possesses the properties:

$$(u^*, y^*) \in \Xi, [y^*, y^*] \geq 0. \quad (26)$$

The proof of this theorem is similar to proof of Proposition 4.1 and Proposition 4.2 in [13].

**Final remarks.** As immediately follows from theorem 3, some admissible pairs  $(u^*, y^*) \in \Xi$  can be attained by optimal solutions to the approximate OCPs (23). Hence, we can conclude that the original optimal control problem (1)–(5) is regular for every  $u_d \in L^2(0, T; L^2(\Gamma_N))$ ,  $f \in L^2(0, T; H^{-1}(\Omega; \Gamma_D))$ ,  $y_0 \in L^2(\Omega)$ , and  $y_d \in L^2(0, T; H_0^1(\Omega; \Gamma_D))$ .

The next observation is crucial in our paper and it deals with the inequality (26)<sub>2</sub>. As Theorem 3 proves, for any approximation  $\{A_k\}_{k \in N}$  of the matrix  $A \in L^2(\Omega; S^3)$  with properties  $\{A_k\}_{k \in N} \subset L^\infty(\Omega; S^3)$  and  $A_k \rightarrow A$  strongly in  $L^2(\Omega; S^3)$ , the optimal solutions to the regularized OCPs (23)–(25) always leads us in the limit to some admissible solution  $(u^*, y^*)$  of the original OCP (1)–(5). Moreover, in general, this limit pair can depend on the choice of the approximative sequence  $\{A_k\}_{k \in N}$ . That's why it is reasonable to call such pairs attainable admissible solutions to OCP (1)–(5). However, as follows from Theorem 2, the pair  $(u^*, y^*)$  is not optimal, in general. Indeed, if  $y_0 \equiv 0$  in  $\Omega$  and distributions  $f \in L^2(0, T; H^{-1}(\Omega))$  and  $u_d \in L^2(0, T; L^2(\Gamma_N))$  are given by the rule (21)–(22), then  $(u_d, y_d)$  is a unique optimal pair to OCP (1)–(5). As was shown in previous section, in this case we have  $[y_d, y_d] = -\alpha < 0$ , where  $\alpha$  is a given strictly positive value, whereas  $[y^*, y^*] \geq 0$  for any attainable pair  $(u^*, y^*)$ . Thus, for given  $f, y_d, y_0, u_d$  the optimal pair  $(u^0, y^0)$  to OCP (1)–(5) cannot be attained through any  $L^\infty$ -approximation of the matrix  $A \in L^2(\Omega; S^3)$ .

## CONCLUSIONS

The given example of the optimal control problem for linear parabolic equation has an unbounded coefficient such that its unique optimal solution has a non-variational character. Namely, the shown solutions, which can be attained through any  $L^\infty$ -approximation of the stream matrix, is not exhaustive for all set of solutions to the above problem.

1. Fannjiang M.A., Papanicolaou G.C. Diffusion in turbulence. *Probab. Theory and Related Fields*, vol. 105, 1996, pp. 279–334.
2. Zhikov V.V. Diffusion in incompressible random flow. *Functional Analysis and Its Applications*, 1997, vol. 31, no. 3, pp. 156–166.
3. Zhikov V.V. Remarks on the uniqueness of a solution of the Dirichlet problem for second-order elliptic equations with lower-order terms. *Functional Analysis and Its Applications*, 2004, no. 3, pp. 173–183.
4. Kogut P.I. *On Approximation of an Optimal Boundary Control Problem for Linear Elliptic Equation with Unbounded Coefficients, Discrete and Continuous Dynamical Systems*. 2014, Series A, 34, no. 5, pp. 2105–2133.
5. Vazquez J.L., Zuazua E. The Hardy inequality and the asymptotic behavior of the heat equation with an inverse-square potential. *J. of Functional Analysis*, 2000, vol. 173, pp. 103–153.
6. Buttazzo G., Kogut P.I. Weak optimal controls in coefficients for linear elliptic problems. *Revista Matematica Complutense*, vol 24, 2011, pp. 83–94.
7. Kogut P.I., Leugering G. *Optimal Control Problems for Partial Differential Equations on Reticulated Domains: Approximation and Asymptotic Analysis*. Birkhäuser, Boston, 2011.
8. Jin T., Mazya V., van Schaftinger J. *Pathological solutions to elliptic problems in divergence form with continuous coefficients*. C. R. Math. Acad. Sci. Paris. 2009, vol. 347, no. 13–14, pp. 773–778.
9. Serrin J. *Pathological solutions of elliptic differential equations*. Ann. Scuola Norm. Sup. Pisa, 1964, vol. 3, no. 18, pp. 385–387.
10. Adams R. *Sobolev spaces*. — Academic Press, New York, 1975.
11. Ivanenko V.I., Mel'nik V.S. *Variational Methods in Optimal Control Problems for Systems with Distributed Parameters*. Kyiv: Naukova Dumka, 1988 (in Russian).
12. Salsa S. *Partial Differential Equations in Action: From Modelling to Theory*. Milan, Springer-Verlag, 2008.
13. Gorbonos S.O., Kogut P.I. Variational solutions of an optimal control problem with unbounded coefficient. *Visnyk DNU. Series: Mathematical Modelling*, vol. 5, (2013), no. 8, pp. 69–83 (in Ukrainian).

Получено 27.03.2014

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕКТНОСТИ ЗАДАЧ ИДЕНТИФИКАЦИИ МНОГОМЕРНЫХ СИСТЕМ ЧАСТОТНЫМ МЕТОДОМ

С.В. Мельничук

*Институт космических исследований НАН Украины и ГКА Украины*

На основе частотного метода установлены и исследованы условия, при которых задачи идентификации по приближенным данным являются корректно поставленными, а когда их решения становятся неустойчивыми. Показано, что для корректной постановки необходимо, чтобы сложность модели согласовывалась с погрешностью исходных данных. Для выбранного частотного метода уровень погрешности зависит от длительности наблюдения и величины шума. Сложность модели определяется числом обусловленности, при котором получается устойчивое решение, которое регулируется с помощью изменения ее размерности. Разработан алгоритм регуляризации задачи идентификации, обеспечивающий слабую чувствительность к погрешностям получаемого частотным методом решения.

**Ключевые слова:** системная идентификация, некорректно поставленная задача, регуляризация.

На основі частотного методу встановлено та досліджено умови, при яких задачі ідентифікації за наближеними даними є коректно поставленими, а коли їх розв'язки стають нестійкими. Показано, що для коректної постановки необхідно, щоб складність моделі узгоджувалась з похибкою вхідних даних. Для вибраного частотного методу рівень похибки залежить від тривалості спостереження та величини шуму. Складність моделі визначається числом обумовленості, при якому отримується стійкий розв'язок, який регулюється за допомогою зміни розмірності моделі. Розроблено алгоритм регуляризації задачі ідентифікації, що забезпечує слабку чутливість до похибок її розв'язку, отриманого частотним методом.

**Ключові слова:** системна ідентифікація, некоректно поставлена задача, регуляризація.

### ВВЕДЕНИЕ

Задачи системной идентификации относятся к классу так называемых обратных, характеризующихся тем, что при определенных условиях они являются некорректно поставленными и их решения становятся сильно чувствительными к погрешности исходных данных. В этих случаях точное решение не может быть получено в принципе, а попытка найти аппроксимирующее решение при разных реализациях погрешности приводит к множеству сильно различающихся моделей, мало пригодных с практической точки зрения. Некорректность в первую очередь свойственна структурно-параметрической идентификации, когда необходимо построить модель, не зная априори ее размерности. Поэтому при идентификации сложных многомерных динамических систем следует ориентироваться на построение только аппроксимирующих моделей такой размерности, при которой получаемое решение является устойчивым или слабо чувствительным к погрешностям.

Факт некорректности хорошо известен, однако установление условий, при которых она возникает, и способы построения регуляризованных решений остаются актуальными для исследований, особенно в условиях ограниченной неопределенности в данных. Поскольку свойство некорректности является фундаментальной особенностью этого класса задач, оно проявляется независимо от того, каким методом решается задача идентификации. В данной работе это свойство детально исследуется для решения задач идентификации на основе одного из частотных методов.

Частотные методы идентификации решают задачу построения модели системы на основе ее частотных характеристик, выделяемых из экспериментально полученных данных. Идентификация производится путем нахождения передаточной функции, коэффициенты которой связаны с частотными характеристиками. Для решения задачи были введены критерии [1, 2], разработан ряд методов [3]. Среди подходов, ориентированных на идентификацию в условиях ограниченной неопределенности, можно выделить конечно-частотный [4, 5], наиболее активно развивающийся в последнее время.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

**Описание частотного метода идентификации.** Исследование корректности задач идентификации проведем на основе частотного метода, описанного в [6]. Будут рассматриваться линейные стационарные устойчивые многомерные системы в пространстве состояний с одним входом и выходом в условиях ограниченной неопределенности, представленной, с целью упрощения, лишь аддитивным шумом  $\eta$  на выходе:

$$\dot{x} = Ax + bu, \quad y = c^T x + \eta, \quad (1)$$

$$\|\eta\|_{l_\infty} \leq \varepsilon_\eta, \quad (2)$$

где  $x$  — вектор состояния,  $A, b, c^T$  — соответственно матрица  $N \times N$ , вектор-столбец  $N \times 1$  и вектор-строка  $1 \times N$ . Размерность  $N$  исходной генерирующей системы (1) большая, априори неизвестная. Задачей является построение приближенной подходящей модели, адекватной системе (1) по выходу  $y$ . В методе частотной идентификации построение математической модели осуществляется по частотным характеристикам, выделяемым из экспериментально полученных выходных сигналов при гармоническом возбуждении системы на входе:

$$u(t) = \sum_{s=1}^S u_s \cdot \sin(\omega_s t + \varphi_s), \quad (3)$$

где  $u_s, \omega_s, \varphi_s$  — соответственно амплитуды, частоты и фазы гармоник сигнала, известные точно,  $S$  — число гармоник. Частоты  $\omega_s$  не должны совпадать:  $\omega_{s_1} \neq \omega_{s_2}, s_1 \neq s_2$ , а  $S$  должно быть заведомо большим, чем

размерность восстанавливаемой модели. Оценки частотных характеристик  $\Phi$  и  $\Psi$  получаются фильтрацией измеренного выходного сигнала на частотах гармоник входного сигнала:

$$\hat{\Phi}_k(\tau) = \frac{2}{u_k \tau} \int_0^\tau y(t) \sin(\omega_k t) dt, \quad \hat{\Psi}_k(\tau) = \frac{2}{u_k \tau} \int_0^\tau y(t) \cos(\omega_k t) dt, \quad k=1, S, \quad (4)$$

где  $\tau$  — длительность наблюдения. В пределе при  $\tau \rightarrow \infty$  получаем их точные значения в случае отсутствия шума  $\eta$  либо когда шум не содержит гармоник, совпадающих по частоте с входными  $\omega_s$ :

$$\Phi_k = \hat{\Phi}_k(\infty), \quad \Psi_k = \hat{\Psi}_k(\infty). \quad (5)$$

Из теории реализаций следует, что система (1) в общем виде для заданных вход-выходных данных соответствует множеству эквивалентных моделей. Поэтому из этого множества выберем реализации с жордановым представлением матрицы системы  $A$  для простоты с некрратными собственными значениями  $\alpha_p \pm i\beta_p$ ,  $\alpha_p < 0$ ,  $\beta_p \geq 0$ :

$$A = \text{diag}(A_p), \quad A_p = \begin{pmatrix} \alpha_p & \beta_p \\ -\beta_p & \alpha_p \end{pmatrix}, \quad p=1, P, \quad x = \text{col}(x_p), \quad x_p = \begin{pmatrix} x_p^{\cos} \\ x_p^{\sin} \end{pmatrix}^T,$$

$$b = \text{col}(B_p), \quad B_p = \begin{pmatrix} b_p^{\cos} \\ b_p^{\sin} \end{pmatrix}^T, \quad c = \text{row}(C_p), \quad C_p = \begin{pmatrix} c_p^{\cos} & c_p^{\sin} \end{pmatrix}$$

что позволяет получить аналитические выражения  $\Phi$  и  $\Psi$  [6]. Значения частотных параметров  $\Phi_k, \Psi_k$  связаны с передаточной функцией системы

$$W(p) = \frac{V(p)}{Q(p)} = \frac{v_{N-1}p^{N-1} + \dots + v_1p + v_0}{p^N + q_{N-1}p^{N-1} + \dots + q_1p + q_0}, \quad \text{где } V(p), Q(p) \text{ —}$$

характеристические полиномы, а полюса которой — собственные значения матрицы  $A$  соотношением

$$V(j\omega_k) - (\Phi_k + j\Psi_k) \cdot Q(j\omega_k) = 0, \quad k=1, S. \quad (6)$$

При параметрической идентификации модели заданного порядка  $N^*$ , для нахождения коэффициентов полинома  $Q(j\omega_k)$  можно использовать систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), получаемую из (4) и (6):

$$H(S) \cdot q(S) = g(S), \quad (7)$$

где  $H(S)$  — матрица системы частотных уравнений,  $q(S)$  — вектор, составленный из коэффициентов полинома  $Q$ . Выражения для матрицы  $H(S)$  и вектора  $g(S)$  приведены в [6]. Размерность вектора  $q(S)$  равна размерности  $N^*$  аппроксимирующей идентифицируемой модели, количество уравнений определяется величинами  $S$  и  $N^*$ . Параметр  $S$  обозначает, что коэффициенты системы (7) зависят от частот гармоник входного

возбуждающего сигнала, а количество ее уравнений зависит от количества гармоник. Для упрощения он может опускаться.

Коэффициенты  $H(S)$  и  $g(S)$  зависят от оценок частотных параметров, т.е. при неточном нахождении  $\Phi$  и  $\Psi$ , (7) является СЛАУ с неточно заданными матрицей  $H(S)$  и правой частью.

Для выбранного порядка модели  $N^*$  из (7) находятся приближенные оценки собственных значений матрицы модели  $\hat{A}$ . Для однозначного определения модели в жордановой форме остается найти любую подходящую реализацию коэффициентов  $\hat{b}$  и  $\hat{c}$ . Согласно теории реализаций, можно достаточно произвольно выбрать значения одного из векторов; тогда коэффициенты второго находятся из переопределенной линейной системы, построенной подстановкой в аналитические выражения частотных характеристик (5) их оценок, а также найденных оценок собственных значений  $\hat{A}$ .

**Погрешности оценок параметров модели.** Погрешности  $\hat{b}$  и  $\hat{c}$  зависят от погрешности, с которой была получена матрица  $\hat{A}$ . Таким образом, пригодность получаемой модели определяется чувствительностью оценок  $\alpha_k \pm i\beta_k$  к имеющимся неточностям. Поскольку они находятся как корни полинома с коэффициентами  $q(S)$ , анализ сводится к рассмотрению погрешности системы (7) с неточно определенными коэффициентами. Представим (7) в виде

$$(H_0(S) + H_1(S, \tau)) \cdot (q^0(S) + q^1(S, \tau)) = g^0(S) + g^1(S, \tau), \quad (8)$$

где  $H_0(S), g^0(S)$  — соответственно точные значения левой и правой части (7),  $H_1(S, \tau), g^1(S, \tau)$  — ошибки, величины которых, в конечном счете, зависят от длительности наблюдения. Векторы  $q^0(S)$  и  $q^1(S, \tau)$  соответствуют точным значениям коэффициентов полинома  $Q$  и их погрешностям. Точность решения системы определяется двумя величинами:

— обусловленностью матрицы  $H_0(S)$ :  $\mu(H_0(S)) = \|H_0^{-1}(S)\| \cdot \|H_0(S)\|$ ;

— погрешностью в данных  $g^1(S, \tau)$ . Погрешности  $H_1(S, \tau), g^1(S, \tau)$  зависят от точности определения оценок частотных параметров. Запишем

$$\hat{\Phi}(\tau) = \Phi + \Delta\hat{\Phi}^{\text{det}}(\tau) + \Delta\hat{\Phi}^{\text{noise}}(\tau), \quad \hat{\Psi}(\tau) = \Psi + \Delta\hat{\Psi}^{\text{det}}(\tau) + \Delta\hat{\Psi}^{\text{noise}}(\tau), \quad (9)$$

где  $\Delta\hat{\Phi}^{\text{noise}}(\tau), \Delta\hat{\Psi}^{\text{noise}}(\tau)$  — погрешности, возникающие при фильтрации аддитивного шума,  $\Delta\hat{\Phi}^{\text{det}}(\tau), \Delta\hat{\Psi}^{\text{det}}(\tau)$  — погрешности, возникающие вследствие конечности интервала интегрирования незашумленного выхода системы (далее будем их определять, как «ошибку от  $\tau$ »). При практическом применении, оценки содержат также ошибки численного метода интегрирования и вычислительные. Пусть аддитивный шумовой сигнал

имеет вид суммы конечного числа шумовых гармоник

$$\eta(t) = \sum_{z=1}^Z \eta_z \cdot \sin(\omega_z^{(\eta)} t + \varphi_z^{(\eta)}), \quad (10)$$

где  $\eta_z, \omega_z^{(\eta)}, \varphi_z^{(\eta)}$  — соответственно амплитуды, частоты и фазы,  $Z$  — их количество.

Вклад каждой  $z$ -й шумовой гармоники в ошибку оценки частотной характеристики при фильтрации на  $k$ -й частоте входного сигнала, в нерезонансном случае ( $\omega_k \neq \omega_z^{(\eta)}$ ) можно представить как величину  $O\left(\frac{\varepsilon_{zk}}{\tau}\right)$ ,

где  $\varepsilon_{zk} = \frac{\eta_z}{u_k}$  — отношение амплитуд гармоник шумового и возбуждающего сигналов [6].

Для нерезонансного случая имеем  $\Delta\hat{\Phi}^{\text{noise}}(\tau), \Delta\hat{\Psi}^{\text{noise}}(\tau) = O\left(\frac{\varepsilon}{\tau}\right)$ , где  $\varepsilon = \frac{\|\eta(t)\|}{\|y(t)\|}$  — отношение шума к сигналу. В резонансном случае вносимая ошибка не будет зависеть от длительности времени интегрирования  $\tau$ . Из аналитических выражений можно аналогично получить оценку ошибки, зависящую от  $\tau$ :  $\Delta\hat{\Phi}^{\text{det}}(\tau), \Delta\hat{\Psi}^{\text{det}}(\tau) = O\left(\frac{1}{\tau}\right)$ . В итоге, можно записать

$$\frac{\|q^1(\tau)\|}{\|q^0\|} \leq \mu(H_0) \cdot \tilde{H} \left( O_1\left(\frac{1}{\tau}\right) + O_2\left(\frac{\varepsilon}{\tau}\right) + \Delta^{\text{num.int.}} + \Delta^{\text{comp.err.}} \right), \quad (11)$$

где  $\Delta^{\text{num.int.}}, \Delta^{\text{comp.err.}}$  — ошибки численного интегрирования и вычислительная,  $O_1\left(\frac{1}{\tau}\right), O_2\left(\frac{\varepsilon}{\tau}\right)$  — ошибки, порожденные конечностью  $\tau$  и шумом  $\eta$ , а  $\tilde{H}(\cdot)$  — неточно заданная матрица системы (7).

Из (11) видно, что влияет на точность при определении коэффициентов  $Q$ : обусловленность матрицы системы (7), порядки длительности интервала интегрирования  $\tau$  и величина  $\varepsilon$ , характеризующая шум. Величины погрешностей коэффициентов определяют пригодность модели. В случае если они велики, такая модель непригодна, а сама задача является некорректно поставленной.

## ЦЕЛЬ

Целью исследований является установление условий некорректности и введение процедуры регуляризации задачи идентификации для выбранного частотного метода.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

**Исследование детерминированного случая.** Для изучения условий некорректности воспользуемся соотношением (11) и исследуем влияние выражений, определяющих погрешность. Поскольку ошибки оценок параметров модели зависят от многих составляющих, исследуем их по отдельности. Полагая  $\tau = \infty$  и вычисля частотные характеристики по аналитическим формулам, получаем их точные (до вычислительных ошибок) значения. Избавившись таким образом от слагаемых  $O_1(\frac{1}{\tau}), O_2(\frac{\varepsilon}{\tau}), \Delta^{\text{num.int.}}$  в (11), а также получив с точностью до вычислительных ошибок матрицу  $H_0$ , представляется возможным исследование поведения  $\mu(H_0)$ , а также влияния вычислительных ошибок.

*Обусловленность матрицы частотных уравнений.* Исследуем основной фактор, влияющий на устойчивость решения СЛАУ (7), обусловленность  $\mu(H_0)$ , когда матрица  $H_0$  известна точно.

Для большого числа случайно сгенерированных моделей размерностей  $N = 2 \div 7$  при входном сигнале, состоящем из  $S = 12$  гармоник, восстанавливались модели, имеющие размерность, совпадающую с размерностью генерирующей системы, т.е.  $N^* = N$ . Усредненные значения обусловленности для разных генерирующих систем представлены на рис. 1.

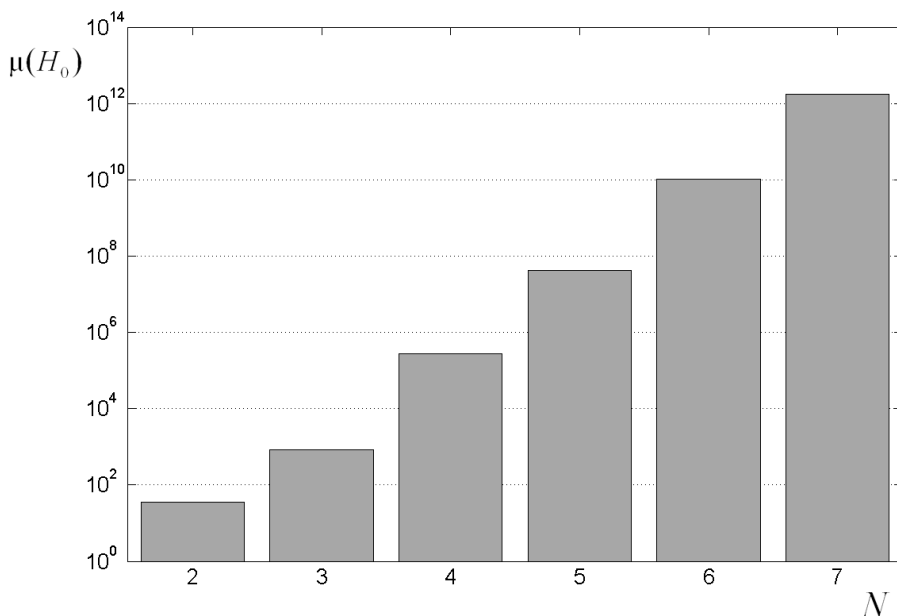


Рис. 1. Средние значения обусловленности матриц систем частотных уравнений

Как видим, обусловленность матрицы системы (7) возрастает примерно на два порядка при увеличении размерности генерирующей системы на порядок.



Рассмотрим теперь поведение обусловленности систем при идентификации аппроксимирующих редуцированных моделей ( $N < N^*$ ). Для большого числа генерирующих систем размерности  $N=8$  находились максимальные, средние и минимальные значения обусловленности матриц системы (7) для аппроксимирующих моделей размерностей  $N^* = 2 \div 7$ . Результаты приведены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что рост обусловленности в среднем на два порядка сохраняется, но абсолютное значение может сильно варьироваться. Из этого можно заключить, что обусловленность зависит от структурных свойств конкретной системы.

При проведении экспериментов также было замечено, что рост обусловленности неравномерен. Увеличение порядка модели на единицу может дать как сильное увеличение обусловленности, так и незначительное.

*Влияние вычислительных погрешностей.* Проведем вычислительные эксперименты с целью изучить влияние вычислительных ошибок на точность определения параметров моделей. При этом будем использовать различные процедуры рандомизации для нахождения вариации значений параметров.

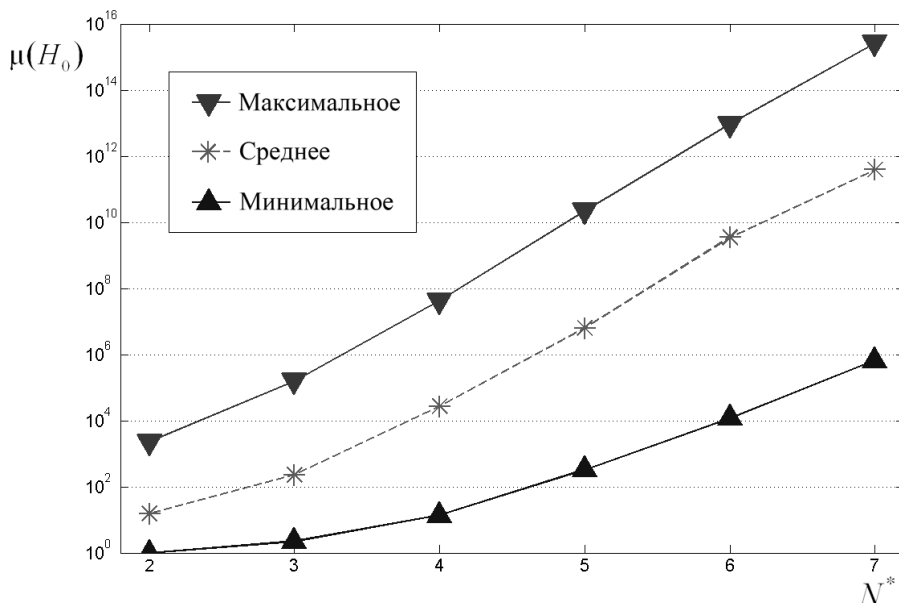


Рис. 2. Значения обусловленности матриц систем частотных уравнений аппроксимирующих моделей разной размерности

Вычислительная ошибка порождается неточным (в общем случае) представлением действительных чисел в памяти машины. Величины ошибок представления определяются длиной мантиссы используемого типа данных. Без применения экстенсивных методов вычислительную ошибку невозможно уменьшить, а избавиться от нее принципиально невозможно.

Для оценки влияния вычислительной погрешности были проведены следующие эксперименты: задавались различные входные данные, для которых при отсутствии ошибок вычисления должен был бы получаться одинаковый результат. Тогда получаемая вариация оценок параметров

модели позволяет судить о влиянии ошибок вычислений.

Были проведены эксперименты двух типов:

1. При заданном входном сигнале и фиксированных  $A, b$  варьировались коэффициенты  $c$ . Для полноразмерных моделей, при отсутствии ошибок вычисления, значения оценок собственных чисел  $\hat{A}$  при любых  $c$  должны были бы точно совпадать.

2. Фиксировалась вся система, а варьировались частоты входного сигнала.

В обоих типах экспериментов влияние вычислительных ошибок проявляется в появлении на комплексной плоскости множеств оценок собственных значений, по разбросу которых определяется чувствительность к погрешностям вычислений. Вычисления производились с типом данных с плавающей точкой двойной точности. Частотные характеристики определялись по аналитическим формулам для  $\tau = \infty$ , т.е. могли содержать только вычислительную ошибку.

На рис. 3 показаны точные собственные значения систем (крестиками) и их модельные оценки (кругами), полученные в детерминированном случае для генерирующих систем 10-го и 11-го порядков с одинаковыми матрицами  $A, b$  и различными коэффициентами векторов  $c$ . Полученные разбросы оценок собственных чисел означают, что для данных систем  $N^* = 11$  параметры моделей вычисляются с большой погрешностью даже на основе точных исходных данных. Таким образом, решение задачи идентификации модели  $N^* = 11$  в данном случае оказалось сильно чувствительным к вычислительным ошибкам, а сама задача в данных условиях оказалась некорректно поставленной.

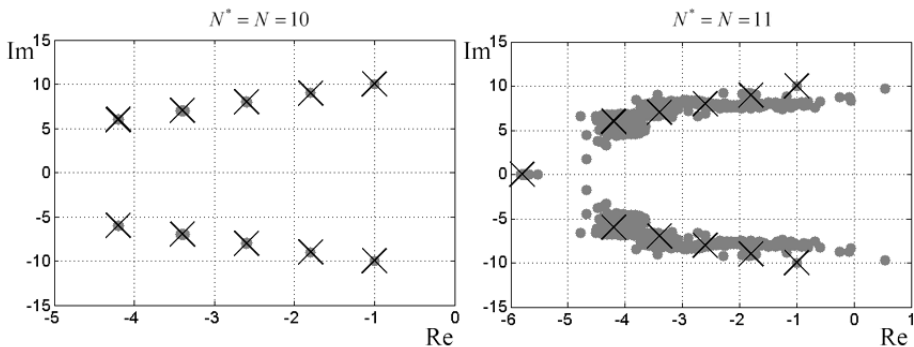


Рис. 3. Вариации оценок собственных значений моделей, порожденные вычислительными ошибками

Для определения условий некорректности в детерминированном случае был проведен эксперимент, в котором для большого числа систем разной размерности по чувствительности оценок параметров их моделей к вычислительным ошибкам определялась корректность задач их идентификации. Также находилось число обусловленности  $\mu(H_0)$  системы (7). Результаты приведены на рис. 4.

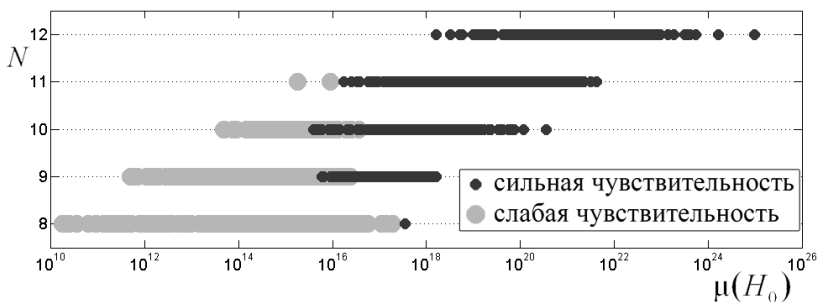


Рис. 4. Чувствительность оценок собственных значений моделей к вычислительным ошибкам

Из рисунка видны предельно допустимые значения обусловленности  $\mu(H_0)$  порядка  $10^{16} - 10^{17}$ , при превышении которых решение становится неустойчивым по отношению к вычислительным ошибкам. Это значит, что использование типа данных с плавающей точкой двойной точности ограничивает возможности использования метода идентификации. Границей служит обусловленность матрицы системы частотных уравнений (7) (порядка  $10^{17}$ ) либо размерность модели ( $N$  или  $N^*$  не выше 11). В аналогичных экспериментах было также установлено, что для систем с чисто действительными собственными значениями размерность модели не может превышать 9. Пороговое значение числа обусловленности  $\mu(H_0) = 10^{17}$  будем считать границей, выше которой находить модель бессмысленно: задача некорректна всегда, а найденные модели будут практически непригодными.

Использование обоих типов экспериментов по выделению только вычислительных ошибок дало совпадающие результаты.

**Исследование влияния погрешностей исходных данных.** Исследуем влияние на точность оценивания параметров модели тех составляющих (11), которые в детерминированном случае обнулялись. Полагая  $\tau$  конечным, перейдем к рассмотрению недетерминированного случая, для которого (7) будет определяться неточно. Проведем исследование точности получаемых оценок частотных параметров, а затем интегральное влияние неопределенности на точность определения параметров модели и корректность постановки задачи идентификации.

*Сходимость оценок частотных характеристик.* Исследуем, как ведет себя погрешность получаемых оценок частотных характеристик от длительности эксперимента. Для этого рассмотрим системы порядка  $N = 10$  с тремя парами комплексно-сопряженных и четырьмя действительными собственными значениями матрицы  $A$ . На вход подавался полигармонический сигнал из  $S = 12$  гармоник, а шумовой сигнал представлялся в виде суммы восьми гармоник.

На рис. 5 приведены значения величин максимальных по всем координатам относительных погрешностей оценивания частотных характеристик. Сплошной линией показана ошибка, порождающаяся конечностью интервала интегрирования  $\tau$  незашумленного выхода. Пунктиром показаны ошибки, вносящиеся шумом  $\eta$  для нерезонансного

случая при уровнях  $\varepsilon = \frac{\|\eta\|_\infty}{\|y\|_\infty} = 0,01; 0,1$  (масштабировались амплитуды шумовых гармоник). Штриховыми линиями показана ошибка, возникающая в резонансном случае.

Разница частот в случае близком к резонансу составляла 0,001. Все частотные характеристики рассчитывались по аналитическим формулам, т.е. ошибок численного интегрирования не содержат.

Из рис. 5 видно, что величины  $\Delta\hat{\Phi}^{\text{det}}(\tau), \Delta\hat{\Psi}^{\text{det}}(\tau)$  зависят от длительности эксперимента  $\tau$  обратно пропорционально, а  $\Delta\hat{\Phi}^{\text{noise}}(\tau), \Delta\hat{\Psi}^{\text{noise}}(\tau)$  — практически везде пропорционально  $\frac{\varepsilon}{\tau}$ . Лишь при очень близком расположении одной из частот шума  $\omega_z^{(\eta)}$  к частоте одной из гармоник входного сигнала  $\omega_{\text{rez}}$ , получаемые оценки составляющих частотных параметров  $\hat{\Phi}_{\text{rez}}, \hat{\Psi}_{\text{rez}}$  становятся неудовлетворительными.

*Исследование зависимости от длительности наблюдения.* Рассмотрим влияние ошибки, порождаемой конечностью времени интегрирования:  $\tau \neq \infty$ . Рассматривать будем случай без шума, так как при наличии шума, в нерезонансном случае, закономерности будут аналогичные, поскольку погрешности оценок частотных параметров, порождающие их, убывают при увеличении  $\tau$  с равной скоростью.

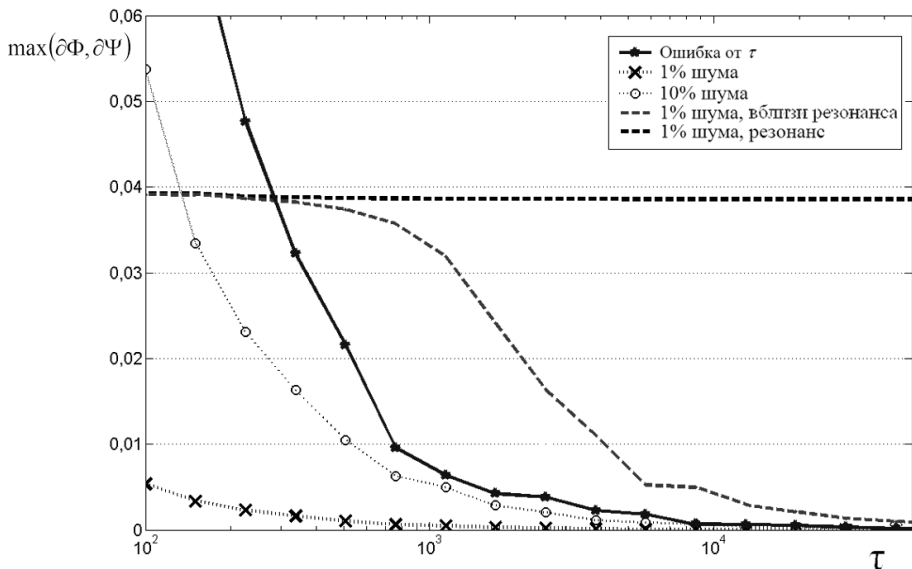


Рис. 5. Относительная ошибка определения частотных характеристик в зависимости от длительности эксперимента

Если варьировать  $\tau$  в некотором малом интервале около фиксированного  $\tau^*$ , это дает возможность получать рандомизированный набор данных для решения системы (7). Разбросы оценок параметров аппроксимирующей модели с  $N^* = 3$  при  $N = 10$  приведены на рис. 6.

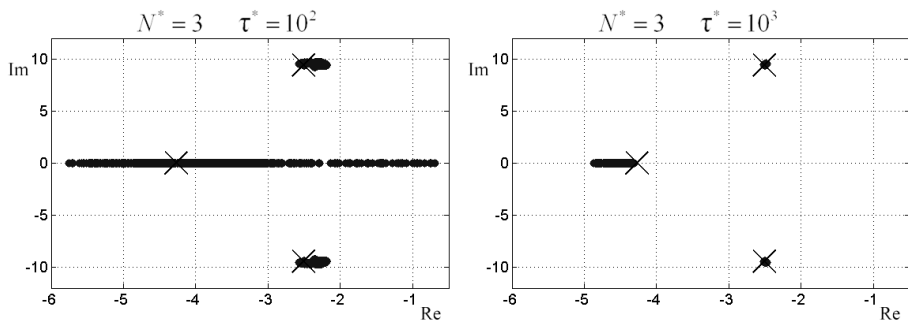


Рис. 6. Вариации оценок собственных чисел аппроксимирующей модели в зависимости от длительности наблюдения

Разбросы оценок собственных значений для модели третьего порядка при длительности эксперимента порядка  $\tau^* = 10^2$  показаны слева, а при  $\tau^* = 10^3$  — справа. Крестиками обозначены собственные значения аппроксимирующей модели при точных исходных данных.

Увеличение порядка модели приводит к необходимости на порядки увеличивать длительность эксперимента. Для построения сложных моделей, допустимых вычислительными ошибками, требуются длительности практически нереализуемые в экспериментах.

Таким образом, размерность аппроксимирующей модели следует согласовывать с величиной ошибки вычисления частотных характеристик, которые, в свою очередь, зависят от  $\tau$  и  $\varepsilon$ . При фиксированной длительности  $\tau$  от выбранной размерности модели  $N^*$  зависит, будет ли задача корректной, а решение — устойчивым. Это фундаментальное свойство процедуры идентификации представлено в табл. 1 и 2. В табл. 1 генерирующая система имела порядок 10 (три пары комплексно-сопряженных и четыре действительных собственных числа), а в табл. 2 — тот же порядок, но все собственные значения были действительными. Для различных значений размерности модели  $N^*$  и длительностей  $\tau$ , устойчивость получаемых решений устанавливалась с использованием рандомизации. Темным выделены соотношения  $\tau/N^*$ , при которых решение, на основе получаемых разбросов, квалифицировалось как неустойчивое. Светлая область соответствует устойчивому решению (слабо чувствительному к погрешности). В таблицах также приведены получаемые значения обусловленности  $\mu(H)$  для этих моделей.

При увеличении длительности  $\tau$  разброс оценок параметров при фиксированной размерности модели сужается. Чтобы получить модель более высоких порядков, требуется согласованное увеличение  $\tau$ .

Из таблиц видно, что граница устойчивости существенно зависит от того, какие были собственные значения у генерирующей системы. Для первой системы при равном значении длительности наблюдения можно построить модель более высокого порядка, чем для второй. Из табл. 2 видно, что для второй системы построить модель 9-го и 10-го порядков вообще не удается, вследствие установленного выше ограничения на обусловленность

$\mu(H_0)=10^{17}$ , после которого на результат существенно влияют вычислительные ошибки.

**Таблица 1**

*Числа обусловленности матриц систем частотных уравнений и корректность постановки задачи идентификации в зависимости от соотношения размерности модели и длительности наблюдения для генерирующей системы с тремя комплексно-сопряженными парами и четырьмя действительными собственными значениями*

Длительность наблюдения	Размерность модели									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$10^2$	$3,5*10^0$	$5,0*10^1$	$3,6*10^3$	$1,2*10^5$	$1,4*10^6$	$4,2*10^7$	$2,1*10^8$	$7,5*10^9$	$6,6*10^{10}$	
$10^3$	$3,2*10^0$	$4,9*10^1$	$9,7*10^2$	$4,4*10^4$	$7,6*10^5$	$2,0*10^8$	$2,9*10^9$	$3,4*10^{10}$	$1,2*10^{12}$	
$10^4$	$3,2*10^0$	$4,9*10^1$	$9,0*10^2$	$3,1*10^4$	$6,3*10^5$	$2,0*10^8$	$2,0*10^{10}$	$4,6*10^{11}$	$6,3*10^{12}$	
$10^5$	$3,2*10^0$	$4,9*10^1$	$8,9*10^2$	$3,0*10^4$	$6,2*10^5$	$1,2*10^8$	$2,1*10^{10}$	$2,3*10^{11}$	$6,1*10^{13}$	
$10^6$	$3,2*10^0$	$4,9*10^1$	$8,9*10^2$	$2,9*10^4$	$6,2*10^5$	$1,1*10^8$	$8,6*10^9$	$1,4*10^{11}$	$1,1*10^{15}$	
$10^7$	$3,2*10^0$	$4,9*10^1$	$8,9*10^2$	$2,9*10^4$	$6,2*10^5$	$1,1*10^8$	$7,9*10^9$	$1,4*10^{11}$	$6,3*10^{14}$	
$10^8$	$3,2*10^0$	$4,9*10^1$	$8,9*10^2$	$2,9*10^4$	$6,2*10^5$	$1,1*10^8$	$7,9*10^9$	$1,4*10^{11}$	$6,3*10^{14}$	

Заметим, что значение обусловленности  $\mu(H_0)$  при конечном  $\tau$  неизвестно, но его можно оценивать по величине  $\mu(H)$ , которая сходится к  $\mu(H_0)$  при увеличении  $\tau$ .

**Таблица 2**

*Числа обусловленности матриц систем частотных уравнений и корректность постановки задачи идентификации в зависимости от соотношения размерности модели и длительности наблюдения для генерирующей системы с десятью действительными собственными значениями*

Длительность наблюдения	Размерность модели									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$10^2$	$3,6*10^1$	$1,3*10^3$	$1,7*10^4$	$1,3*10^5$	$2,1*10^6$	$2,1*10^7$	$1,1*10^9$	$4,3*10^{10}$	$1,1*10^{12}$	
$10^3$	$2,4*10^1$	$2,2*10^3$	$3,8*10^4$	$1,0*10^6$	$1,0*10^7$	$8,9*10^7$	$6,5*10^9$	$2,0*10^{11}$	$2,6*10^{12}$	
$10^4$	$2,3*10^1$	$8,3*10^2$	$5,8*10^5$	$4,0*10^6$	$9,6*10^7$	$7,1*10^8$	$4,0*10^{10}$	$5,2*10^{11}$	$9,7*10^{13}$	
$10^5$	$2,3*10^1$	$7,8*10^2$	$1,9*10^5$	$3,7*10^7$	$4,4*10^8$	$5,9*10^9$	$9,1*10^{10}$	$6,3*10^{12}$	$3,5*10^{14}$	
$10^6$	$2,3*10^1$	$7,8*10^2$	$1,7*10^5$	$4,2*10^7$	$4,4*10^9$	$3,9*10^{10}$	$1,2*10^{12}$	$8,2*10^{12}$	$8,1*10^{14}$	
$10^7$	$2,3*10^1$	$7,8*10^2$	$1,7*10^5$	$3,5*10^7$	$1,4*10^{10}$	$2,1*10^{11}$	$6,3*10^{12}$	$6,3*10^{13}$	$1,0*10^{16}$	
$10^8$	$2,3*10^1$	$7,8*10^2$	$1,7*10^5$	$3,5*10^7$	$6,3*10^9$	$3,0*10^{12}$	$3,4*10^{13}$	$1,4*10^{15}$	$1,7*10^{16}$	
$10^9$	$2,3*10^1$	$7,8*10^2$	$1,7*10^5$	$3,5*10^7$	$5,8*10^9$	$2,1*10^{12}$	$2,1*10^{14}$	$2,7*10^{15}$	$2,5*10^{17}$	
$10^{10}$	$2,3*10^1$	$7,8*10^2$	$1,7*10^5$	$3,5*10^7$	$5,8*10^9$	$1,4*10^{12}$	$1,8*10^{15}$	$2,3*10^{16}$	$9,1*10^{17}$	
бесконечность	$2,3*10^1$	$7,8*10^2$	$1,7*10^5$	$3,5*10^7$	$5,8*10^9$	$1,4*10^{12}$	$1,2*10^{15}$	$3,6*10^{17}$	$4,6*10^{18}$	

Таким образом, для корректного определения аппроксимирующей модели нельзя выходить за пределы устойчивой области. Причем ее границу лучше всего устанавливать по числу обусловленности, что следует из табл. 1 и 2. Методом численного моделирования были проведены вычислительные эксперименты по установлению областей устойчивости для генерирующих систем с разными структурными свойствами, которые варьировались в широком диапазоне. Результаты этих исследований представлены на рис. 7.

На плоскости параметров  $\tau$ ,  $\mu(H)$  показаны области, где задачи идентификации для систем при всех возможных параметрах являются корректно поставленными, а где — нет. Область А соответствует моделям, слабо чувствительным к погрешностям в исходных данных. Область В — переходная: модель с сингулярным числом из этой области может оказаться по условиям корректности как пригодной, так и непригодной в зависимости от того, какие параметры имела генерирующая система. Область С — область некорректной постановки задачи идентификации; модели, соответствующие этой области, непригодны. D обозначает область, в которой некорректность вызывается наличием вычислительной ошибки, определена порогом в  $\mu(H) = 10^{17}$ .

Критерий пригодности модели по разбросу оценок ее параметров субъективен; в данном эксперименте пригодной считалась модель, у которой оценки всех собственных значений не отклонялись более чем на 5 % от своего среднего значения (при локальном варьировании  $\tau$ ). При применении других критериев пригодности, а также в случае наличия шума и численном интегрировании при нахождении оценок частотных параметров, границы областей показанных на рис. 7, могут варьироваться. Тем не менее, общая картина сохраняется.

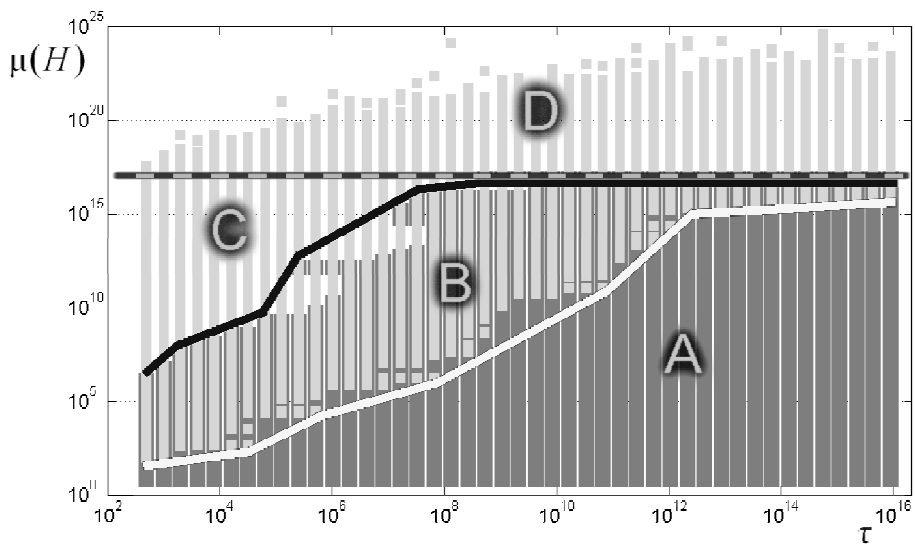


Рис. 7. Области устойчивости решения задачи идентификации

При построении аппроксимирующей модели, выбор ее размерности должен всегда связываться с имеющейся неопределенностью. При этом

оценки собственных значений модели могут существенно отличаться от собственных значений исходной системы. При увеличении размерности аппроксимирующей модели от  $N^*$  к  $N^* + 1$  в пределах области устойчивости невязка по выходу  $\|y - \hat{y}\|$  будет уменьшаться. На рис. 8 показаны зависимости ошибок по выходу  $\|y - \hat{y}\|$  от  $\tau$  для аппроксимирующих моделей разных порядков при двух разных генерирующих системах 10-го порядка.

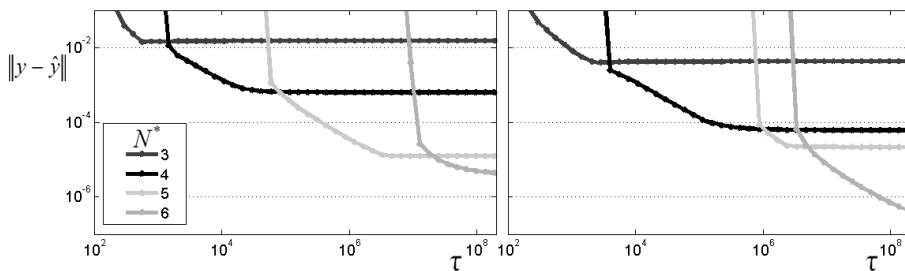


Рис. 8. Невязки аппроксимирующих моделей по выходу для двух генерирующих систем 10-го порядка

С увеличением длительности наблюдения  $\tau$ , уровень погрешности оценивания частотных характеристик уменьшается и задачи идентификации моделей более высоких порядков становятся корректными. Видно также, что при увеличении  $\tau$  после некоторого порогового значения, качество модели не улучшается, а ее параметры практически не чувствительны к изменениям реализаций шума и погрешностей. Так, для системы (рис. 8, левая часть), при  $\tau = 10^6$  аппроксимирующие модели 6-го порядка и выше являются непригодными, тогда как модели до  $N^* = 5$  пригодны. Увеличение длительности до  $\tau = 10^8$  делает корректной задачу для модели  $N^* = 6$ , хотя прирост точности небольшой.

Таким образом, можно констатировать, что задачи идентификации многомерных систем могут быть как корректно, так и некорректно поставленными, в зависимости от того, какие используются для этого исходные данные. Если идентификация проводится частотным методом, то основными характеристиками данных являются длительность эксперимента  $\tau$  и погрешность  $\varepsilon$ . Параметром регуляризации в этих задачах является размерность модели  $N^*$ , либо, правильнее, число обусловленности  $\mu(H)$ . Для его определения можно использовать рис. 7. Если в области В нет сингулярных чисел, то любая модель соответствующая области А является аппроксимирующей. Наиболее близкой к точной будет та, у которой  $\mu(H)$  наибольшее. Когда в В находятся сингулярные числа (обычно это одно или два значения), корректная модель с наилучшей аппроксимацией может быть среди них. Установить это можно, используя процедуру рандомизации по  $\tau$  для построения множества собственных значений модели соответствующей размерности. По разбросу точек на этих множествах судим о пригодности модели.



## Выводы

Исследование задач идентификации многомерных систем на основе частотного метода показало, что корректность задачи построения аппроксимирующей модели зависит от многих факторов, главным из которых является соотношение величин имеющейся неопределенности и сложности восстанавливаемой модели. Для данного метода они определялись соответственно величинами  $\tau$ ,  $\varepsilon$  и  $\mu(H)$ .

Только модели, полученные при решении корректно поставленной задачи, могут иметь практическую пригодность, в ином случае оценки параметров моделей становятся сильно чувствительными к различным погрешностям. Примененный метод рандомизации предполагает построение множества моделей по имеющимся экспериментальным данным. Определение устойчивости получаемых решений производится по разбросу параметров, соответствующих жордановской реализации.

Для моделей различных структур снижение порядка аппроксимирующей модели снижает чувствительность ее параметров к неопределенности в данных. В этом смысле размерность искомой модели  $N^*$  можно рассматривать как параметр регуляризации задачи идентификации. При изменении  $N^*$ , меняется  $\mu(H)$ , с которой непосредственно связывается вариация оценок. Было получено разбиение плоскости  $\tau - \mu(H)$  на области, где задачи построения аппроксимирующих моделей будут корректными, а где — нет, что позволяет упростить проведение регуляризации задачи.

1. Кардашев А.А. Определение параметров системы по экспериментальным (заданным) частотным характеристикам / А.А. Кардашев, Л.В. Карнюшин // Автоматика и телемеханика. — 1958. — Т. 19, № 4. — С. 334–345.
2. Levy E.C. Complex curve fitting. / E.C. Levy // IRE Transactions on Automatic Control. — 1959 — Vol. 4 — P. 37–49.
3. Pintelon R. Parametric identification of transfer functions in the frequency domain — A survey. / R. Pintelon, P. Guillaume, Y. Rolain, J. Shoukens, H. Van hamme // IEEE Transactions on Automatic Control. — 1994 — Vol. AC-39, No. 11 — P. 2245–2260.
4. Александров А.Г. Метод частотных параметров / А.Г. Александров // Автоматика и телемеханика. — 1989. — Т. 50, № 12. — С. 3–15.
5. Александров А.Г. Конечно-частотная идентификация многомерных объектов / А.Г. Александров, Ю.Ф. Орлов // Тр. 2-й Российско-шведской конференции по автоматическому управлению. RSCC'95. — СПб., 1995. — С. 65–69.
6. Губарев В.Ф. Идентификация многомерных систем по параметрам установившегося режима / В.Ф. Губарев, С.В. Мельничук // Проблемы управления и информатики. — 2012. — № 5. — С. 26–42.

Получено 04.04.2014

## **ВНУТРЕННИЕ И ВНЕШНИЕ КОНФЛИКТЫ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ**

**В.В. Павлов, Ю.М. Шепетуха**

*Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины*

Предложена сетцентрическая парадигма, которая позволяет осуществить конфигурирование и интеграцию распределенных элементов знаний, а также выполнить эффективное моделирование человеко-машинных и внутримашинных прикладных процессов. Кроме того, появляется возможность для образного отображения и исследования существенных элементов различных видов внутренних и внешних конфликтов.

**Ключевые слова:** управление, распределенная система, конфликтная ситуация, прикладной процесс, формирование знаний, человеко-машинная система, сетцентрическая концепция, интеграция.

Запропоновано мережецентричну парадигму, яка дає можливість виконати конфігурування та інтеграцію розподілених елементів знань, а також провести ефективно моделювання людино-машинних та внутрішньомашинних прикладних процесів. Крім того, з'являється можливість для образного відображення та дослідження суттєвих елементів різних видів внутрішніх та зовнішніх конфліктів.

**Ключові слова:** управління, розподілена система, конфліктна ситуація, прикладний процес, формування знань, людино-машинна система, мережецентрична концепція, інтеграція.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Во многих современных публикациях высказываются мнения о том, что магистральным направлением дальнейшего развития компьютеризованных систем является не столько технологическое усовершенствование, сколько повышение уровня интеллектуализации построенных на их основе систем. Так, авторы работы [1] отмечают существенное расширение объема и разнообразия исследований в области искусственного интеллекта. Необходимо подчеркнуть тесную связь фундаментальной проблемы создания теории искусственного интеллекта и прикладных задач повышения уровня интеллектуализации систем, созданных на основе различных видов современных информационно-коммуникационных технологий. Еще в ранних работах по искусственному интеллекту отмечалось, что одним из наиболее перспективных направлений является создание компьютеризованных систем моделирования и поддержки отдельных элементов мыслительной деятельности человека [2]. Однако, несмотря на большое число как фундаментальных, так и прикладных работ в этой области, исключительная сложность задач, связанных с разработкой, моделированием и внедрением интеллектуальных систем, является основной причиной нерешенности многих актуальных вопросов.

## **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Следует отметить, что в последнее время претерпела существенные изменения сама концепция построения интеллектуальных систем. Если вначале ставилась глобальная задача создания универсального искусственного интеллекта, то сейчас главное внимание уделяется разработке систем с элементами «специализированного» интеллекта, которые используются для решения различных конкретных типов задач в достаточно узких и четко определенных предметных областях. Подобный подход концентрирует усилия не столько на исследовании общих закономерностей и взаимозависимостей процессов мышления человека, сколько на синтезе компьютеризованных технических средств, усиливающих возможности человека успешно действовать в сложных ситуациях, характеризующихся большим числом противоречивых критериев, плохой структурированностью, динамически изменяющейся внешней средой и т.д. Разработчики эффективных интеллектуальных комплексов должны, во-первых, использовать современные информационно-коммуникационные технологии и, во-вторых, основываться на адекватной концепции анализа и синтеза компьютеризованных систем. В этом плане следует выделить организмическую концепцию, эффективность которой была продемонстрирована при разработке средств управления объектами и процессами различной природы в достаточно сложных ситуациях — при недостаточности информации, в условиях жесткого дефицита времени, противодействия и т.д. На базе организмической концепции развилась теория эргатических систем, использующая знания о моделях осмысленного поведения человека в качестве основы построения интеллектуальных человеко-машинных комплексов [3].

## **ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Двумя основными современными тенденциями в развитии информационно-коммуникационных систем являются, с одной стороны, их быстрое технологическое совершенствование и, с другой стороны, существенное повышение разнообразия и уровня сложности решаемых ими задач. При этом зачастую возникает определенное несоответствие между возможностями, предоставляемыми новыми техническими средствами, и пониманием того, для решения каких конкретных задач их наиболее целесообразно использовать. Поэтому целью настоящей работы является определение способов преодоления такого несоответствия на основе уяснения и исследования концептуальных проблем, возникающих при создании распределенных систем интеллектуального управления, функционирующих в сложной конфликтной среде.

## **ПОДДЕРЖКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ И МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЗНАНИЙ**

Для успешного решения поставленной задачи необходимо, прежде всего, четко представлять себе, что организация всех процессов человеко-машинного взаимодействия — получение и анализ данных, построение моделей, исследование динамики процессов — имеет своей основной целью информационно-коммуникационное обеспечение интеллектуальной деятельности в рассматриваемой предметной области. При таком подходе процессы обработки информационных потоков являются основным связующим звеном между, с одной стороны, своевременным получением необходимых сведений и, с другой стороны, принятием эффективных решений и осуществлением требуемых для достижения поставленных целей действий. Как известно, принятие решений в любой предметной области невозможно без понимания как существенных взаимосвязей между объектами данной области, так и механизма влияния внешней среды на динамику изменения этих взаимосвязей. Другими словами, принятие решений является интеллектуальным действием, основанным на осознании и учете особенностей как описывающих объект управления моделей (зачастую достаточно сложных и нелинейных), так и характера внешних воздействий на систему. Для успешного осуществления этого требуется создание эффективных механизмов работы со знаниями, в частности — разработка алгоритмов формирования, преобразования и использования формализованных и неформализованных элементов знаний. В соответствии с современными представлениями ведущих исследователей в данной области [4], необходимо, во-первых, проводить четкую границу между информацией и знаниями и, во-вторых, понимать различную роль эксплицитных и имплицитных знаний. Эксплицитные знания являются универсальными, четко осознанными и артикулированными, позволяющими успешно действовать в разнообразных повторяющихся ситуациях. Имплицитные знания являются неосознанными и нечетко артикулированными, часто основанными на практическом опыте и интуиции, они больше подходят для действий в уникальных ситуациях. Большинство реальных фрагментов знаний, как правило, занимает некоторое промежуточное положение в интервале между полностью эксплицитными и полностью имплицитными знаниями.

В связи с вышеизложенным, важным моментом построения интеллектуальных систем является конструирование эффективных диалоговых процедур извлечения, анализа и структурирования распределенных во времени и пространстве элементов знаний. В ходе взаимодействия человека с современными информационно-коммуникационными технологиями происходит получение и последовательное уточнение качественной информации о сути подлежащей решению проблемы, а также количественных данных о значениях существенных параметров ситуации. На основе системного

конфигурирования и интеграции такой распределенной во времени и пространстве информации происходит формирование элементов знаний и профессионального интеллекта, которые дают возможность как получать, уточнять и модифицировать возможные решения в данной специализированной предметной области, так и определять тот момент, когда дальнейшая корректировка допустимых решений исследуемой проблемы становится по тем или иным причинам нецелесообразной. Такой подход к построению человеко-машинных интеллектуальных систем позволяет, с одной стороны, использовать современные информационно-коммуникационные технологии для интегрирования распределенных элементов знаний о решаемой проблеме и, с другой стороны, применять сформированные фрагменты профессионального интеллекта для корректировки значений целевых переменных и критериев оценки эффективности полученных решений.

### **СЕТЕЦЕНТРИЧНОСТЬ КАК НОВАЯ СИСТЕМНАЯ ПАРАДИГМА**

Для эффективного конфигурирования и интеграции распределенных во времени и пространстве элементов знаний целесообразно использовать новую системную парадигму, основанную на концепции сетецентричности. Данная парадигма позволяет не просто объединить распределенные во времени и пространстве процессы преобразования информации в единую интеллектуальную систему, а достичь синергии взаимодействующих локальных информационных сегментов. Концепция сетецентричности предусматривает формирование и использование интегрированного информационного пространства, что обеспечивает своевременность принимаемых решений, а также их обоснованность и взаимную координацию. Для практического применения сетецентрической парадигмы наиболее целесообразно использовать такие современные информационно-коммуникационные средства, как сетевые компьютерные технологии.

В современной литературе высказывается мнение, что именно сеть дает возможность создания глобального информационного пространства и математически однородной функциональной среды для процессов управления различного назначения, с широкими возможностями для их текущего применения и будущего совершенствования [5]. Сетевые технологии позволяют осуществить как моделирование и исследование распределенных элементов знания и информации, так и эффективную координацию составляющих единого процесса интеллектуального управления. Каждый из элементов компьютерной сети, осуществляющий формирование, преобразование, прием или передачу информационных потоков, целесообразно рассматривать как некоторый локальный прикладной процесс. При подобном подходе сама сеть концептуально рассматривается как определенная системная организация локальных прикладных процессов и их информационных моделей.

## ПРИКЛАДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И КОНФЛИКТЫ

В современных публикациях часто принято разделять прикладные процессы на два больших класса: человеко-машинные (иначе называемые интерактивными) и внутримашинные (иначе называемые программными). Человеко-машинные прикладные процессы обычно являются не полностью структурированными, что делает невозможным их полную автоматизацию и исключение человека из контура управления. Такие прикладные процессы требуют разработки эффективных диалоговых процедур взаимодействия между человеком и информационно-коммуникационными технологиями, а также должны предусматривать рациональное распределение функций между этими двумя элементами системы. Структура внутримашинных прикладных процессов обычно является более определенной и устойчивой, динамика развития этих процессов часто описывается детерминированными соотношениями без стохастических компонентов. Однако исследование таких процессов является не менее трудной задачей, так как зависимости между их существенными переменными могут описываться достаточно сложными математическими моделями, например нелинейными дифференциальными или разностными уравнениями, уравнениями с запаздывающим аргументом и т.д. В последние годы многими исследователями показано, что такие процессы часто порождают ряд непредсказуемых эффектов, таких как возникновение бифуркаций и появление нетрадиционных типов аттракторов.

Любая распределенная интеллектуальная структура, представляющая собой системную организацию локальных прикладных процессов, должна эффективно действовать в разнообразных ситуациях, в том числе в условиях неопределенности и противодействия. Для успешного решения этой задачи ей необходимо принимать и исполнять решения с учетом большого числа факторов, зачастую противоречивых по своей природе. Иными словами, такая система должна успешно функционировать при наличии конфликтных ситуаций различного типа и разной степени выраженности. Поэтому перед исследователем прежде всего возникает проблема систематизации конфликтов. Так, в [6] приводится классификация некоторых типов ситуаций, приводящих или потенциально могущих привести к конфликту. Автор разделяет все возможные ситуации на четыре больших класса — «единство», «содействие», «нейтралитет» и «противодействие». Далее эти классы разбиваются на подклассы. Так, содействие включает в себя формы коалиции, содружества и симбиоза. Противодействие, в свою очередь, разбивается на нестрогий конфликт, строгий конфликт и антагонизм. Отметим, что динамика изменения конфликтной ситуации может быть достаточно сложной, что обуславливает возможность перехода конфликта из одной формы в другую. Поэтому важное практическое значение имеет создание интеллектуальных систем, позволяющих успешно функционировать при различных видах конфликтов, а также в широком интервале конкретных

значений параметров конфликтной ситуации.

В соответствии с организмической теорией синтеза человеко-машинных систем, построение интеллектуальной системы разрешения конфликтов предлагается осуществлять в следующей последовательности [7]:

- формирование опорной структуры функциональных поведений системы;
- формирование целедостигающих функциональных поведений системы на множестве возникающих внешних конфликтных ситуаций, другими словами, формирование структуры ситуационного управления;
- формирование целедостигающих поведений системы на совокупности возникающих внутренних конфликтных ситуаций, другими словами, формирование структуры внутриситуационного управления.

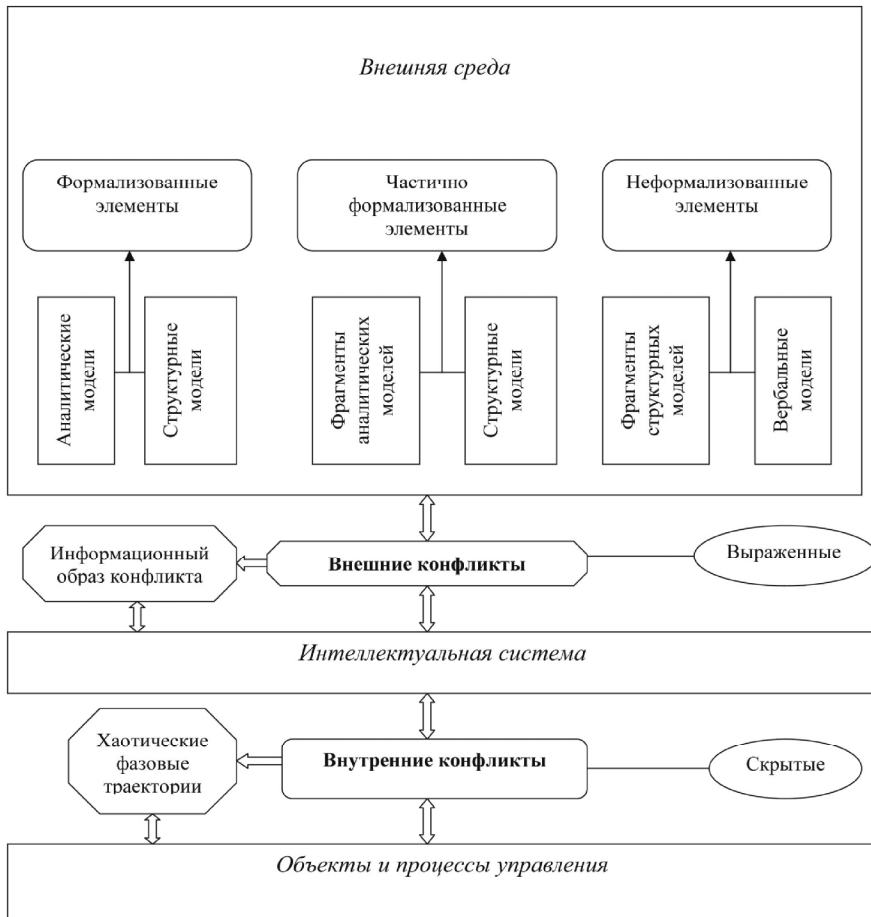


Рис. 1. Возможные типы конфликтов в распределенной системе интеллектуального управления

При использовании данного подхода конфликты в распределенной системе интеллектуального управления можно разделить на два принципиально отличающихся друг от друга типа (рис. 1). Во-первых, это конфликты, возникающие при взаимодействии со сложной внешней динамической средой, которая содержит слабо структурированные элементы,

подвержена постоянным изменениям, а также может оказывать противодействие достижению системой своих краткосрочных и долгосрочных целей. Плохая структурированность и выраженная конфликтность подобной внешней среды обуславливает необходимость исследования взаимозависимостей (которые часто являются нелинейными по своей природе) между отдельными составными частями внешней конфликтной ситуации. При моделировании и анализе подобных сложных нелинейных процессов могут также возникать конфликты, принципиально отличающиеся по своему характеру от вышеперечисленных выраженных внешних конфликтов. Такие конфликты будем называть внутренними. Эти конфликты обычно являются не столь явно выраженными и определяются, в первую очередь, не свойствами внешней среды, а спецификой математических моделей, описывающих динамику объектов и процессов управления.

### **ОСОБЕННОСТИ АНАЛИЗА ВНЕШНИХ КОНФЛИКТОВ**

Таким образом, построение целостной системы распределенного интеллектуального управления требует скоординированного во времени и пространстве моделирования и исследования порождаемых при функционировании системы внутренних и внешних конфликтов. Отметим, что методологические подходы к анализу этих двух типов конфликтов существенно отличаются друг от друга. Разрешение внешних конфликтов основано на своевременном получении достоверных данных о значениях всей совокупности параметров, характеризующих текущую ситуацию, что обеспечивает возможность ее моделирования, анализа и формирования интегрированного информационного образа конфликта. При этом основная трудность анализа конфликтных ситуаций данного типа заключается в исследовании и структурировании взаимоотношений между распределенными функциональными элементами сложного динамического процесса. Системная интеграция большого числа локальных подпроцессов в единую целенаправленную систему достигается за счет скоординированного взаимодействия элементов аналитических, вербальных и структурных моделей, а также их комбинирования — с целью обеспечения успешных действий в широком диапазоне конкретных значений параметров конфликтной ситуации. Таким образом, сложность решения внешних конфликтов обуславливает необходимость совместного использования как формализованных, так и неформализованных элементов знаний. Иными словами, анализ внешних конфликтов должен основываться на эффективной процедуре взаимодействия между, с одной стороны, принимающим решения человеком и, с другой стороны, компьютеризованными средствами моделирования ситуации и поддержки принятия решения.

Важными аспектами построения распределенных интеллектуальных систем управления является как разработка механизмов анализа и разрешения стереотипных конфликтных ситуаций, так и выработка навыков действий в непредвиденных случаях. Поэтому необходимо также создать



процедуры поэтапного извлечения, обработки и структуризации фрагментов неформализованных знаний людей, являющихся экспертами в данной специализированной предметной области. Специфические особенности такой диалоговой процедуры извлечения и анализа знаний и, на основе этого, последовательного все более глубокого проникновения в суть данной проблемы отражают требования к скорости и точности решений. При этом следует принимать во внимание такие существенные переменные анализируемой проблемы, как ее размерность, степень рассредоточения данных, уровень неопределенности, структура взаимозависимостей между отдельными компонентами проблемы [8]. Актуальной практической задачей также является определение тех конкретных областей профессиональной деятельности человека, в которых результаты использования предлагаемого подхода являются наиболее многообещающими. Такие области должны удовлетворять ряду специфических требований и ограничений. Во-первых, профессиональная деятельность человека должна быть связана не с выполнением стереотипных действий и рутинных процедур, а с интеллектуальными процессами, такими как анализ проблем и принятие решений в условиях реального времени. Во-вторых, при этом используются установившиеся в течение длительного времени и часто формально верифицированные механизмы анализа и успешного решения стереотипных профессиональных задач в данной предметной области. Усвоение и осмысление этих процедур, выделение их наиболее характерных черт, моделирование существенных для успешного функционирования системы взаимосвязей — все это является основой для формирования отдельных элементов знаний, а также для преобразования знаний из неявной в явную форму. Как результат, повышается уровень интеллекта синтезируемой системы и обеспечивается более эффективное и надежное ее функционирование.

## **ОСОБЕННОСТИ АНАЛИЗА ВНУТРЕННИХ КОНФЛИКТОВ**

В отличие от изложенного выше интерактивного подхода к разрешению внешних конфликтов, механизмы разрешения внутренних конфликтов являются более четко структурированными. Так как многие интересные случаи возникновения и развития внутренних конфликтов связаны с порождением хаотических фазовых траекторий, их разрешение основывается на формализованных алгоритмах управления хаосом и синхронизации возникающих в системе хаотических явлений. Подобная «балансировка» хаотических явлений, характерная для внутримашинных прикладных процессов (рис. 2), представляет собой необходимое условие достижения стабильных функциональных поведений системы. Отметим еще раз специфическую черту внутренних конфликтов — они обычно характеризуются меньшей степенью выраженности, а иногда могут не проявлять себя в течение достаточно длительного промежутка времени. Важным аспектом также является то, что динамика соответствующих

внутримашинных прикладных процессов описывается сравнительно небольшим числом типичных сценариев и порождает ряд характерных эффектов. Одним из таких эффектов является удвоение периода, что, как правило, предшествует появлению хаотических явлений в системах, динамические свойства которых описываются различными видами нелинейных зависимостей. При этом данные о конкретных значениях параметров, при которых возникает эффект удвоения периода, являются одними из наиболее существенных информационных характеристик исследуемого нелинейного динамического процесса. Величины этих параметров используются как при анализе механизмов порождения хаоса, так и при построении процедур синхронизации хаотических явлений [9].



Рис. 2. Взаимодействие прикладных процессов в распределенной системе интеллектуального управления

Динамические системы, описываемые нелинейными дифференциальными или разностными уравнениями, могут характеризоваться несколькими специфическими типами функциональных поведений:

- 1) направленными на достижение некоторых фиксированных конечных состояний;
- 2) функциональные поведения, фазовые траектории которых образуют определенные виды предельных циклов;
- 3) особый тип функциональных поведений, при котором фазовые траектории формируют множества достаточно сложных конфигураций, называемые «хаотическими аттракторами». Особенностью функциональных поведений третьего типа является то, что в этом случае элементы хаоса возникают в системе, динамические свойства которой описываются детерминированными соотношениями, например нелинейными дифференциальными уравнениями, не содержащими среди своих членов стохастических компонентов. Процессы, происходящие в такой системе,

характеризуются тем, что незначительные вариации их начальных условий по истечении определенного интервала времени могут порождать принципиально отличные друг от друга фазовые траектории. Именно подобная повышенная чувствительность к начальным условиям является специфической чертой внутримашинных прикладных процессов.

## **ПОСТРОЕНИЕ ЦЕЛОСТНОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ**

Успешное разрешение внутренних и внешних конфликтов обеспечивается за счет рациональной структурно-функциональной организации целостной интеллектуальной системы. При этом основной задачей является формирование информационных потоков, которые позволяют анализировать динамику взаимодействия различных элементов как внутримашинных, так и человеко-машинных прикладных процессов, а также обеспечивают возможность своевременного и качественного управления ими. Одним из важных этапов построения целостной системы является определение необходимой степени агрегации циркулирующих в системе потоков данных, а также анализ влияния выбранного уровня агрегации на быстроту и качество принимаемых решений. Как показывает опыт, требуемая степень агрегации зависит от типа решаемой проблемы, конкретного вида человеко-машинного интерфейса, напряженности работы и ряда других факторов. Так, для сложных и быстро меняющихся ситуаций отображение существенных компонентов внешнего конфликта в виде интегральных образов может содействовать успешной адаптации интеллектуальной системы к большому объему распределенной информации. Для этого необходимо так организовать взаимодействие между человеком и компьютеризованными техническими средствами, чтобы максимально эффективным образом использовать положительные свойства этих двух сторон человеко-машинного прикладного процесса. За счет этого также обеспечивается выполнение приведенного в [10] одного из основных принципов построения информационных систем — соответствия между решаемой проблемой, используемыми для этого техническими средствами, а также характеристиками человека, участвующего в анализе данной проблемы. Обученный человек, на основе использования своих имплицитных знаний, часто может сформировать некоторое подмножество  $S_B$  опорных стратегий разрешения конфликтной ситуации. По мере артикуляции таких знаний и постепенного преобразования их в эксплицитную форму, происходит пополнение базы знаний интеллектуальной системы. После чего функции формирования подмножества опорных стратегий могут возлагаться уже не только на человека, но и на компьютеризованные технические средства. Другими словами, «центр тяжести» обработки информации в такой системе смещается от человеко-машинных к внутримашинным прикладным процессам. Соответственно этому и баланс между внешними и внутренними конфликтами смещается в сторону последних. Человек начинает выполнять исключительно функции контроля правильности и надежности

функционирования внутримашинных алгоритмов. Эти алгоритмы осуществляют автоматическое разбиение исходного множества  $S_0$  ситуаций на конечное число непересекающихся подмножеств  $S_1, S_2, S_3, \dots, S_m$ , являющихся прообразами подмножеств опорных стратегий  $C_{B1}, C_{B2}, C_{B3}, \dots, C_{Bm}$ . Разбиение исходного множества на классы эквивалентности и задание отношений упорядоченности на соответствующих фактор-множествах обладают достаточной гибкостью, т.е. обеспечивают возможности не только для адаптации под данную конкретную конфликтную ситуацию, но для модификации решений при изменении целей системы. Поэтому данный подход позволяет создавать эффективные процедуры разрешения конфликтов с учетом как процессов, которые принципиально не поддаются формализации в виде аналитических моделей, так и процессов, приводящих к возникновению в системе хаотических явлений.

## Выводы

Одной из основных концептуальных проблем создания компьютеризованных систем является обеспечение соответствия между возможностями, предоставляемыми современными информационно-коммуникационными технологиями, и уяснением того, для решения каких задач их наиболее целесообразно использовать.

Успешное функционирование систем интеллектуального управления базируется на эффективности механизмов извлечения, структурирования и применения распределенных фрагментов как формализованных, так и неформализованных знаний.

Одной из наиболее перспективных является методология решения задач распределенного управления на основе сетцентрической парадигмы с использованием внутренних и внешних информационных образов конфликтной ситуации.

Вышеуказанная методология дает возможность для эффективного моделирования и исследования различных видов человеко-машинных и внутримашинных прикладных процессов.

1. Goebel R. The expanding breadth of artificial intelligence research / R. Goebel, M.A. Williams // *Artificial Intelligence*. — 2010. — Vol. 174, No. 2. — P. 133.
2. Пospelов Г.С. Искусственный интеллект — основа новой информационной технологии / Г.С. Пospelов — М. : Наука, 1988. — 280 с.
3. Павлов В.В. Начала теории эргатических систем / В.В. Павлов — К. : Наук. думка, 1975. — 237 с.
4. Nonaka I. Tacit knowledge and knowledge conversion: controversy and advancement in organizational knowledge creation theory / I. Nonaka, G. von Krogh // *Organizational Sciences*. — 2009. — Vol. 20, No. 3. — P. 635–652.
5. Затуливитер Ю.С. Проблемы глобализации парадигмы управления в математически однородном поле компьютерной информации / Ю.С. Затуливитер // *Проблемы управления*. — 2005. — № 1. — С. 2–10.
6. Дружинин В.В. Конфликтная радиолокация / В.В. Дружинин, Д.С. Конторов. — М. : Радио и связь, 1982. — 124 с.

7. Павлов В.В. Конфликты в технических системах / В.В. Павлов — К. : Выща школа, 1982. — 184 с.
8. Swink M. Presenting geographic information: effects of data aggregation, dispersion, and users' spatial orientation / M. Swink, C. Speier // Decision Sciences. — 1999. — Vol. 30, No. 1. — P. 169–195.
9. Gauthier D.J. Controlling chaos. / D.J. Gauthier // American Journal of Physics. — 2003. — Vol. 71, No. 8. — P. 750–759.
10. Goodhue D.L. Task — technology fit and individual performance / D.L. Goodhue, C.L. Thompson // MIS Quarterly. — 1995. — Vol. 19, No. 2. — P. 213–236.

Получено 20.12.2013

# Информатика и информационные технологии

УДК 004.75+004.932.2:616

## ПОДГОТОВКА МЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ К ОБРАБОТКЕ В БОЛЬШИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ХРАНИЛИЩАХ

А.С. Коваленко, А.А. Пезенцали, Е.К. Царенко

*Международный научно-учебный центр информационных технологий  
и систем НАН Украины и МОН Украины*

Определены особенности и требования к формированию цифровых медицинских изображений, даны укрупненные стадии их жизненного цикла. Представлена 3-уровневая схема хранения и оперирования медицинскими изображениями на уровне лечебно-диагностических систем, временного хранилища учреждения здравоохранения и долгосрочного хранения и анализа в больших информационных хранилищах. Определены задачи уровней, жизненный цикл и требования к цифровым медицинским изображениям, предложена схема подготовки этих изображений для передачи и обработки в больших информационных хранилищах.

**Ключевые слова:** медицинские изображения, DICOM, обработка и хранение, Грид.

Визначено особливості та вимоги до формування цифрових медичних зображень, дано укрупнені стадії їх життєвого циклу. Представлено 3-рівневу систему збереження та оперування медичними зображеннями на рівні лікувально-діагностичних систем, тимчасового сховища закладу охорони здоров'я та тривалого зберігання й аналізу в великому інформаційному сховищі за межами закладу охорони здоров'я. Визначено завдання рівнів, життєвий цикл і вимоги до цифрових медичних зображень, запропоновано схему підготовки цих зображень для передачі та обробки в великих інформаційних сховищах.

**Ключові слова:** медичні зображення, DICOM, обробка і зберігання, Грід.

### ВВЕДЕНИЕ

Расширяется сфера внедрения информационных технологий в практическое здравоохранение. Центральный этап таких технологий нацелен на поддержку диагностического процесса. Одной из главных актуальных задач практического здравоохранения является усовершенствование работы с цифровыми медицинскими изображениями (ЦМИ). Диагностические приборы и комплексы формируют медицинские изображения в электронном виде, а для использования их врачами-практиками необходимо их хранение, обработка и анализ. Благодаря развитию информационных систем в настоящее время созданы и функционируют большие информационные хранилища типа Грид или «облачных» хранилищ. Они позволяют в своей

среде не только содержать медицинские цифровые изображения, но и проводить их обработку и анализ.

В то же время широко начали использоваться специализированные информационные системы хранения и архивирования цифровых медицинских изображений (PACS — англ. Picture Archiving and Communication system). Такие системы позволяют хранить, обрабатывать и использовать эти информационные объекты в медицинских целях. Использование подобных систем в практике украинского здравоохранения крайне ограничено. Это связано с проблемой перехода медицинских учреждений на электронный документооборот, который до сих пор не реализован.

**Цель работы** — определение основных условий, подбор методов и средств подготовки и передачи медицинских изображений для использования в больших информационных хранилищах (на примере Грид).

## **АНАЛИЗ СТАДИЙ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЦИФРОВЫХ МЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Диагностический процесс сопровождается протоколированием результатов обследования пациентов. С настоящее время все большее применение получают электронные формы медицинских записей и документов. Достигнута достаточно высокая степень формализации медицинских записей и документов, несущих информацию о результатах анамнеза, клинико-лабораторных исследований, анкетирования, эти виды электронных медицинских документов широко используются. Большая часть результатов функциональной диагностики являются медицинскими изображениями исследуемых органов и тканей. Медицинские изображения как отдельный вид медицинских документов несут большое количество информации о состоянии исследуемого пациента, которая не всегда может быть использована врачом в полном объеме.

Современная диагностическая техника позволяет получать медицинские изображения не только в аналоговом, но и в цифровом форматах. Так как многие диагностические процессы, особенно с привлечением средств телемедицинских технологий, основываются на анализе цифровых медицинских изображений, для разработки информационных технологий диагностики необходим анализ и учет особенностей жизненного цикла цифровых медицинских изображений. Жизненный цикл описывает процесс создания, последовательного преобразования и дальнейшего хранения медицинского изображения.

Очевидно, что цифровые медицинские изображения характеризуются основными свойствами, присущими всей совокупности медицинских документов. Следовательно, принципиальные этапы жизненного цикла медицинских изображений соответствуют таковым для медицинских документов. Структурная организация жизненного цикла определяется видом и характеристиками конкретного диагностического процесса, в котором используется анализируемое медицинское изображение.

Для решения задач данного исследования осуществлено укрупнение стадий жизненного цикла ЦМИ, описанных в [1], определены сферы использования при информатизации лечебно-диагностического процесса. Предоставим краткое описание укрупненных стадий жизненного цикла.

1. Создание аналогового или цифрового изображения вместе с минимально необходимыми метаданными и преобразование аналогового изображения в цифровой формат.

2. Каталогизация, создание метаданных вручную или автоматизированными методами.

3. Обеспечение сохранения изображений с возможностями быстрого доступа.

4. Обеспечение поиска изображения с использованием классификаторов, метаданных, полнотекстового или других технологий поиска и визуализация изображения для просмотра (по результатам поиска).

6. Повторное использование и создание новой версии (копии) изображения для нового использования.

8. Предоставление доступа и общая обработка методами одновременной работы «в реальном времени» или последовательно.

9. Передача, экспорт и распространение изображения в защищенном режиме.

10. Хранение: сохранение неактивных изображений, безопасное уничтожение изображений, для которых закончился согласованный срок хранения, обеспечение длительного хранения и доступности изображений бессрочной ценности.

Состав и последовательность стадий и этапов жизненного цикла ЦМИ, а также модель жизненного цикла может меняться в зависимости от технологических процессов и особенностей документооборота, в котором ЦМИ задействованы, от целей и задач документооборота, от назначения, ценности и состава ЦМИ и связанных документов, от количества пользователей ЦМИ, от организационного и технологического обеспечения документооборота и от других факторов.

Предоставляемые технологические и методологические характеристики основных требований к жизненному циклу цифровых медицинских изображений в каждом конкретном случае их использования обеспечиваются организационно-технической и информационной поддержкой задействованных стадий. Надо подчеркнуть необходимость обеспечения информационной непрерывности переходов между стадиями согласно жизненному циклу на технологическом, методологическом, организационно-техническом уровнях.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ЦИФРОВЫМ МЕДИЦИНСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ**

Для использования в диагностическом процессе каждое медицинское изображение дополняется сопроводительной информацией. Содержание и структура этой информации определяется процедурой диагностического



исследования, однако не всегда имеется полнота сопроводительной информацией.

Обобщенная структура ЦМИ приведена на рис. 1

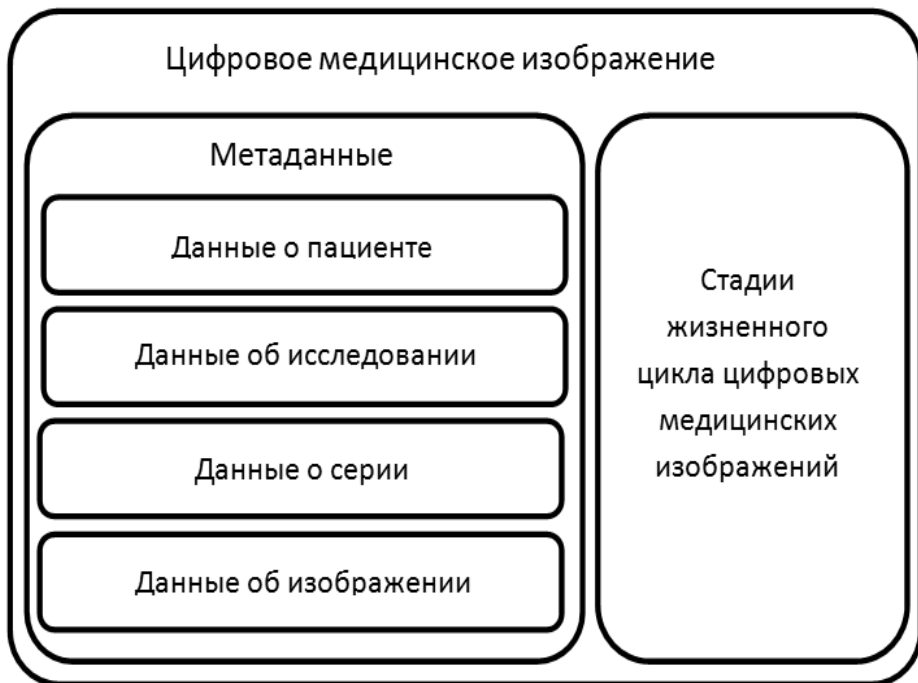


Рис 1. Обобщенная структура комплекса ЦМИ-метаданные

Выделены следующие основные особенности ЦМИ:

— информация отдельного взятого медицинского изображения носит неопределенный характер, диагностическая ценность достигается при использовании ЦМИ в комплексе с метаданными;

— большой размер и сложная структура комплекса ЦМИ-метаданные;

— зависимость характеристик ЦМИ от их происхождения (вид диагностического исследования и программно-аппаратные средства, формирующие цифровые медицинские изображения).

На основе этих особенностей определены требования к цифровым медицинским изображениям:

— необходимость формирования комплекса ЦМИ-метаданные;

— представление ЦМИ в DICOM формате;

— обязательный учет всех этапов жизненного цикла.

Эти требования являются базовыми и обеспечивают возможность сохранения и передачи структурированного комплекса ЦМИ-метаданные, а также управление доступом к ЦМИ различных пользователей из разных систем. Для повышения уровня безошибочной работы с ЦМИ следует проводить фиксирование в журнале действий пользователей при работе с изображением с указанием времени и данных использования, что обеспечивает сохранение истории изменений копии изображения в жизненном цикле.

## ПОДГОТОВКА И ПЕРЕДАЧА ЦИФРОВЫХ МЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СРЕДУ ГРИД

Анализ медицинских DICOM-изображений выполняется при постановке диагноза в процессе оказания медицинской помощи в учреждениях здравоохранения (УЗ) и в научно-исследовательских задачах в Грид.

Медицинское DICOM-изображение, согласно стандарту, представляется экземпляром класса, называемого «пара сервис-объект» (SOP). SOP, в свою очередь, содержит блоки данных [2]:

- 1) пациент — метаданные, идентифицирующие конкретного пациента;
- 2) исследование — метаданные, идентифицирующие врача, время исследования, его параметры;
- 3) серия — метаданные, идентифицирующие модальность, оборудование, производителя, организацию;
- 4) изображение — метаданные, являющиеся цифровым описанием содержимого изображения: тип (это может быть картинка или множество кадров видеозаписи), хранение, пиксели, взаиморасположение, воспроизведение, кадры, конфигурация, фотометрическая интерпретация и т.д.

Таким образом, в файлах DICOM одновременно содержатся и непосредственно изображения, и дополнительная информация о пациенте, которому такое исследование проводилось. Информация о пациенте и исследовании не может быть отделена от самого изображения.

Для решения ряда задач необходимо осуществлять передачу медицинских изображений, которые создаются в процессе диагностики в одном медицинском учреждении, в другое медицинское учреждение для проведения консультаций, формирования дополнительных заключений и других видов деятельности. Разработка средств подготовки и передачи медицинских изображений для использования в больших информационных хранилищах базируется на предложенной трехуровневой системе хранения, передачи и обработки медицинских изображений, состоящей из I уровня — формирования изображений с использованием лечебно-диагностических систем УЗ, II уровня — временного хранения медицинских изображений УЗ и III уровня — долгосрочного хранения и анализа медицинских изображений в среде Грид (рис. 2).

Задача I уровня нацелена на осуществление процессов оказания медицинской помощи УЗ — это формирование разнородных (в частности, по способу получения и назначению) медицинских изображений, характеризующихся представлением изображения в цифровом формате, наличием метаданных о пациенте-источнике и метаданных об условиях получения изображения. Как указано выше, международный стандарт представления этих медицинских изображений с метаданными (регламентированным набором тегов) — DICOM 3.0.

Задачи II уровня — временного хранилища медицинских изображений УЗ — организация получения и упорядочивания медицинских изображений формата DICOM с различных диагностических приборов, организация доступа пользователей корпоративной компьютерной сети УЗ к

изображениям для многократного использования в процессе лечебно-диагностического обслуживания пациента, подготовка изображений для передачи в Грид.

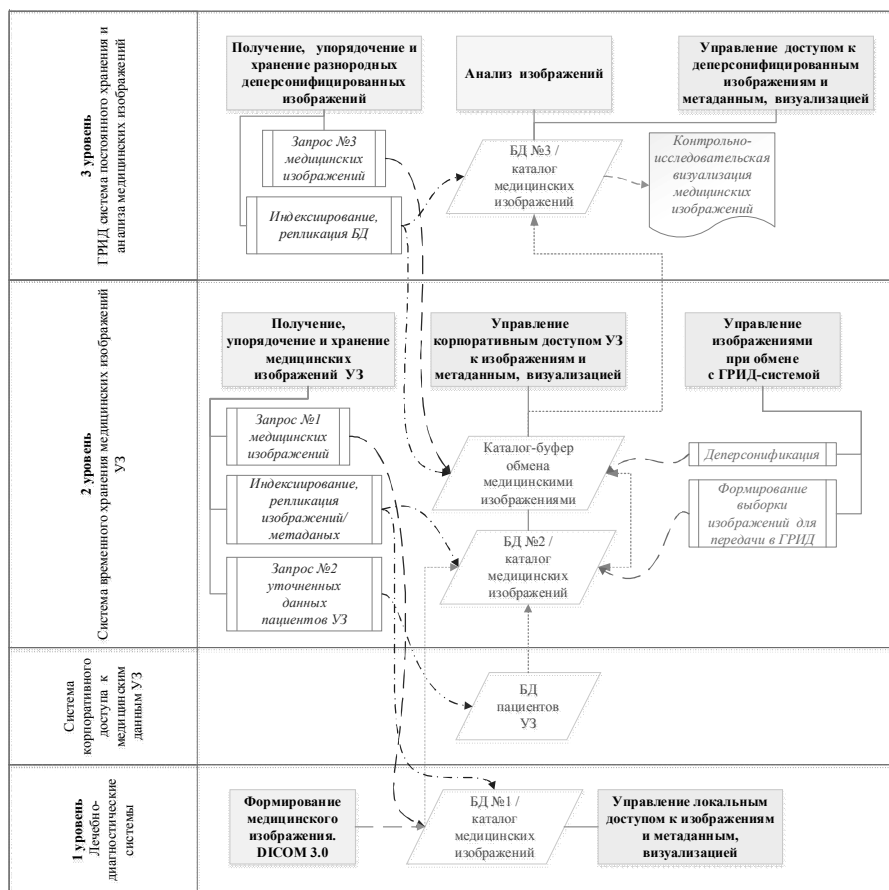


Рис. 2. Схема трехуровневой системы хранения, передачи и обработки медицинских изображений для статистических исследований в среде Грид.

Задачи III уровня (Грид-системы) в данном случае заключаются в организации:

- 1) получения больших объемов разнородных медицинских изображений из различных УЗ,
- 2) хранения и анализа этих изображений,
- 3) подготовки и передачи изображений в УЗ для использования в лечебно-диагностическом процессе при последующих обращениях пациента.

При этом должно соблюдаться основное условие использования Грид-технологий для решения медицинских задач — обеспечение конфиденциальности медицинской информации при выходе ее за пределы УЗ, защита персональных данных.

В заданных условиях подготовка и передача в Грид медицинских изображений, состоящих из собственно изображения в цифровом формате и метаданных, сводится к следующим действиям:

1) упорядочиванию метаданных изображений, получаемых на различных лечебно-диагностических системах УЗ в соответствии со стандартом DICOM 3.0;

2) передаче медицинских изображений формата DICOM 3.0 в хранилище УЗ;

3) упорядочиванию метаданных о пациентах-источниках изображений в соответствии с картотекой и/или базой данных (БД) пациентов УЗ;

4) формированию набора медицинских изображений (с истекшим сроком временного хранения в УЗ) для передачи в Грид;

5) выполнению деперсонификации изображений, предназначенных для передачи в Грид, — процедуры, в которую входит:

а) формирование замещающего идентификатора (ID) пациента в метаданных изображения;

б) сохранение идентифицирующих пациента метаданных изображения и замещающего ID пациента в БД деперсонификации;

в) удаление в медицинском изображении метаданных, идентифицирующих пациента;

б) выкладывание деперсонифицированных изображений в каталог — буфер обмена между хранилищем УЗ и хранилищем Грид;

7) передача деперсонифицированных изображений в хранилище Грид.

Таким образом, системами первого уровня является диагностическая аппаратура для проведения различных диагностических исследований (согласно DICOM — всего 35 видов модальностей): УЗИ, флюорографические системы, рентгеновские, эндоскопические, КТ, МРТ, ангиографические и т.д. Эти системы — источники медицинских изображений, которые должны быть приведены к стандарту DICOM 3.0 с корректно представленными метаданными. В некоторых системах при надлежащей организации работы операторов эта задача выполняется автоматически, в других — для ее выполнения требуется разработка организационно-технических и программных средств.

Организация системы долгосрочного хранилища и анализа медицинских изображений на основе Грид требует значительного объема памяти запоминающих устройств, больших вычислительных мощностей, организации DICOM-сервера с соответствующей пропускной способностью, а также подбора методов и разработки средств обработки и анализа медицинских изображений [3].

По результатам проведенного анализа систем обработки медицинских изображений выявлено что, для организации работы второго уровня в настоящее время реализуется типовое решение хранения и архивирования цифровых медицинских изображений на основе систем PACS, позволяющих хранить медицинские изображения, управлять доступом к ним, визуализировать их, а также редактировать метаданные и обмениваться ими с другими системами.

## Выводы

Выделенные укрупненные стадии жизненного цикла медицинских изображений являются базовыми, состав и последовательность стадий жизненного цикла ЦМИ, а также модель жизненного цикла может меняться в зависимости от технологических процессов и особенностей документооборота, в котором ЦМИ задействованы.

На основе этих особенностей определены требования к цифровым медицинским изображениям:

- необходимость формирования комплекса ЦМИ-метаданные;
- представление ЦМИ в DICOM формате;
- обязательный учет всех этапов жизненного цикла.

Подготовка медицинских изображений к обработке в среде Грид состоит из двух процессов:

- организация программно-технической системы обмена этими изображениями в лечебно-профилактическом учреждении и передачи изображений в Грид;
- предварительная обработка медицинских изображений.

Предложенная трехуровневая схема обмена медицинскими изображениями позволяет упорядочивать медицинскую информацию изображений для использования в лечебно-диагностическом процессе, а также передавать деперсонифицированные медицинские изображения в Грид для долгосрочного хранения и анализа в научно-исследовательских целях.

1. Guidelines For Handling Image Metadata [Электронный ресурс]/ Metadata Working Group. 2010 — Adobe Systems Inc., Apple Inc., Canon Inc., Microsoft Corp., Nokia Corp. and Sony Corp. All rights reserved. — Режим доступа: [http://www.metadataworkinggroup.org/pdf/mwg\\_guidance.pdf](http://www.metadataworkinggroup.org/pdf/mwg_guidance.pdf)
2. EN ISO 12052:2011 Health informatics. Digital imaging and communication in medicine (DICOM) including workflow and data management [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.iso.org>
3. Модель открытой Грид-системы / Е.Е. Журавлев, В.Н. Корниенко, А.Я. Олейников, Т.Д. Широбокова. // Журнал радиоэлектроники. — № 12. — 2012. — С.1–19.

Получено 22.02.2014

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СКРЫТЫХ ФРАГМЕНТОВ ПОЛЯРОГРАФИЧЕСКОЙ ХРОНОПОТЕНЦИОГРАММЫ ИНВЕРСИИ ДВУХ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

**А.Э. Татаринов**

*Международный научно-учебный центр информационных технологий  
и систем НАН Украины и МОН Украины*

Рассматриваются вопросы, связанные с моделированием скрытых фрагментов кривых интенсивности инверсии тяжелых металлов. Разработан алгоритм приближенного моделирования скрытых фрагментов инверсионно-хронопотенциометрического процесса совместного измерения массовой концентрации двух тяжелых металлов, который позволяет осуществить приближенное разделение их массовой концентрации.

**Ключевые слова:** полярография, полярографическая хронопотенциограмма, моделирование, скрытый фрагмент, тяжелый металл.

Розглянуто питання, пов'язані з моделюванням прихованих фрагментів кривих інтенсивності інверсії важких металів. Розроблено алгоритм наближеного моделювання прихованих фрагментів інверсійно-хронопотенціометричного процесу спільного вимірювання масової концентрації двох важких металів, який дозволяє здійснити наближене розділення їхньої масової концентрації.

**Ключові слова:** полярографія, полярографічна хронопотенціограма, моделювання, прихований фрагмент, важкий метал.

### ВВЕДЕНИЕ

Прогрессирующий процесс загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами пагубно влияет на состояние воды, почвы, воздуха, и, следовательно, на здоровье людей, способствуя демографическому дефициту. Поэтому измерение массовой концентрации тяжелых металлов в объектах окружающей среды представляет собой актуальную задачу. В настоящее время широкое распространение получили полярографические методы инверсионной вольтамперометрии и инверсионной хронопотенциометрии. В их основе лежит электрохимическое накопление ионов тяжелых металлов на измерительном электроде при исследовании жидкой пробы вещества, а затем фиксация значений тока (вольтамперометрия) или значений времени (хронопотенциометрия) при изменении потенциала инверсии (растворения). Вольтамперометрия и хронопотенциометрия позволяют определять минимальную концентрацию элемента в жидком растворе на уровне  $10^{-9}$ – $10^{-11}$  мг/кг, что вполне достаточно для оценки качества воды ниже уровня предельно допустимых концентраций (ПДК) тяжелых металлов. Применяемые методы инверсионной хронопотенциометрии за счет больших значений сопротивления в окислительной цепи имеют более высокую защищенность от помех, практически не чувствительны к емкостным токам, что позволяет значительно упростить конструкцию прибора и использовать различные по материалам измерительные электроды. Для концентрации

тяжелых металлов в анализируемой пробе не ниже  $0,001 \text{ мг/дм}^3$  и ПДК которых не ниже  $0,001 \text{ мг/дм}^3$  погрешность ее определения, связанную с перекрытием скрытых фрагментов кривых интенсивности инверсии двух тяжелых металлов, можно не учитывать. Однако в том случае, когда их концентрации в анализируемой пробе ниже  $0,001 \text{ мг/дм}^3$  или ПДК которых ниже  $0,001 \text{ мг/дм}^3$  (например, ртуть), недопустимо вышеуказанную погрешность вносить в метод определения концентрации. Поэтому необходимо удалить или на порядок уменьшить такую погрешность. Это можно сделать путем моделирования скрытых фрагментов кривых интенсивности инверсии тяжелых металлов. В данной статье автор продолжает рассматривать задачу, связанную с моделированием кривых интенсивности инверсии тяжелых металлов в электрохимической ячейке, теоретическое решение которой приведено в [1, 2]. Для этой цели использовался метод, связанный с анализом графиков дифференциальных хронопотенциограмм [1, 3], площадь под которыми прямо пропорциональна концентрации того или иного тяжелого металла.

В [2] рассматривалось теоретическое обоснование наиболее простого способа моделирования инверсионно-хронопотенциометрического процесса измерения массовой концентрации двух тяжелых металлов. При этом сумма площадей, вычисляемая путем приближенного интегрирования под получаемыми модельными кривыми, соответствующими участку совместной инверсии двух металлов, не всегда даже приближенно равна площади под кривой их интенсивности инверсии, которая была вычислена тем же путем по исходным данным для того же участка. Для получения практически значимых результатов требуется разработать алгоритм моделирования, который будет обеспечивать равенство площади под исходной кривой интенсивности инверсии сумме площадей под модельными кривыми для участка совместной инверсии двух металлов. Именно такой случай моделирования процесса совместного измерения массовой концентрации двух тяжелых металлов рассмотрен в настоящей работе.

Изменение интенсивности инверсии двух тяжелых металлов: ртути и мышьяка, диапазоны потенциалов инверсии которых перекрываются, определено по формуле:

$$\frac{dt}{d\varphi} = f_u(\varphi),$$

где  $t$  — время инверсии,  $\varphi$  — потенциал инверсии.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Известна кривая интенсивности инверсии двух тяжелых металлов, содержащихся в пробе, диапазоны потенциалов инверсии которых перекрываются. Требуется разработать алгоритм моделирования скрытых фрагментов кривой интенсивности инверсии. На рис. 1 условно представлена сплошной линией характерная кривая интенсивности инверсии двух тяжелых металлов: ртути и мышьяка.

**Целью исследования** является разработка модели, которая позволяет более точно определить концентрацию каждого тяжелого металла в пробе.

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Определение концентрации тяжелых металлов, присутствующих в пробе, диапазоны потенциалов инверсии которых перекрываются, становится возможным с помощью модельных кривых интенсивности инверсии для каждого тяжелого металла. Такие модельные кривые могут быть получены на основе следующих допущений и предположений (рис. 1).

*Допущение 1.* Перекрывание диапазонов потенциалов инверсии двух тяжелых металлов не изменяет характер процессов инверсии каждого из них, несмотря на то что эти процессы накладываются друг на друга.

*Допущение 2.* Смещение двух концов каждой кривой относительно оси ординат полагается одинаковым.

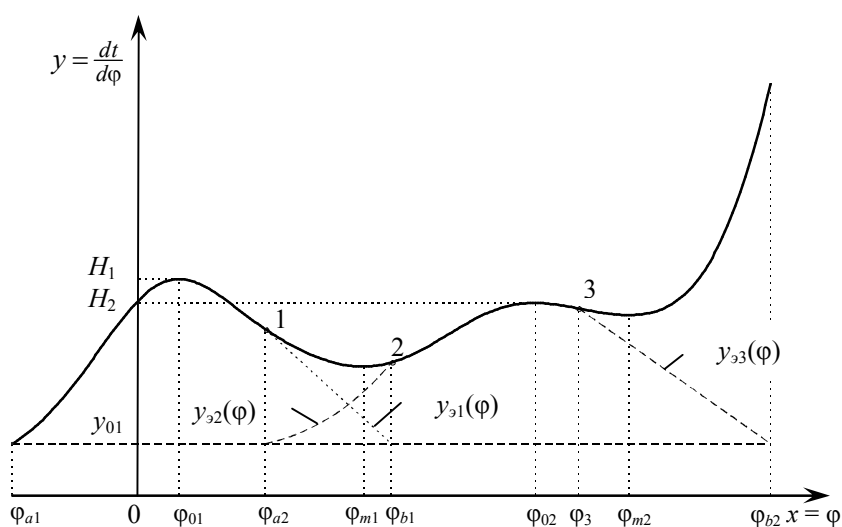


Рис. 1. Кривая интенсивности совместной инверсии двух тяжелых металлов: ртути и мышьяка

Кривая интенсивности совместной инверсии двух тяжелых металлов: ртути и мышьяка (рис. 1) — изображена с пределами инверсии  $[\varphi_{a1}, \varphi_{b1}]$  и  $[\varphi_{a2}, \varphi_{b2}]$  для первого и второго металлов соответственно. Потенциалы  $\varphi_{a1}$  и  $\varphi_{b1}$  соответствуют потенциалам начала и окончания процесса инверсии первого металла, а потенциалы  $\varphi_{a2}$  и  $\varphi_{b2}$  потенциалам начала и окончания процесса инверсии второго металла. На рис. 1 по осям абсцисс показаны значения потенциала инверсии  $\varphi$ , а по осям ординат — значения интенсивности инверсии  $y = \frac{dt}{d\varphi}$ . На кривой интенсивности есть два

максимума. При потенциале инверсии  $\varphi_{01}$  достигается значение первого



максимума кривой интенсивности инверсии  $H_1$ , что соответствует максимальной инверсии первого металла в пробу. Аналогично для второго металла максимум значения кривой интенсивности инверсии  $H_2$  достигается при потенциале инверсии  $\varphi_{02}$ . Согласно рис. 1 диапазоны потенциалов инверсии металлов перекрываются на участке их совместной инверсии  $[\varphi_{a2}, \varphi_{b1}]$ , что соответствует точкам 1 и 2 на графике кривой интенсивности инверсии.

Полагаем, что продолжением кривой интенсивности инверсии первого металла (сплошная линия до точки 1) будет экстраполирующая прямая, обозначенная пунктирной линией  $y_{\varphi 1}(\varphi)$ . Полагаем также, что продолжением кривой интенсивности инверсии второго металла (пунктирная линия до точки 2) будет экстраполирующая исходную кривую кривая, обозначенная пунктирной линией  $y_{\varphi 2}(\varphi)$ . При этом продолжением кривой интенсивности инверсии второго металла (пунктирная линия от точки 3) будет экстраполирующая кривую прямая, обозначенная пунктирной линией  $y_{\varphi 3}(\varphi)$ . Заметим, что в пробе присутствует и третий металл (его кривая интенсивности инверсии располагается за точкой 3), диапазон потенциалов инверсии которого неясен.

Таким образом, для видимых и невидимых концов экстраполяционных прямых и кривых  $y_{\varphi 1}(\varphi)$ ,  $y_{\varphi 2}(\varphi)$  и  $y_{\varphi 3}(\varphi)$  соответственно значения смещения в точке окончания инверсии первого металла, в точках начала и окончания инверсии второго металла равны  $h_{b1} = h_{a2} = h_{b2} = y_{01}$ , где  $y_{01} = y_{a1}$ , так как  $y_{a1}$  — значение кривой интенсивности инверсии, соответствующее потенциалу начала процесса инверсии  $\varphi_{a1}$  первого тяжелого металла.

Учитывая приведенные допущения, решение задачи состоит в следующем.

Напомним, что анализ хронопотенциограммы заключается в определении площади под графиком кривых интенсивности инверсии [2], поскольку последняя, соответствующая времени инверсии  $t$ , прямо пропорциональна массовой концентрации соответствующего тяжелого металла.

Поскольку кривые интенсивности инверсии вместе с их скрытыми продолжениями могут быть представлены в табличном виде, площади под ними следует искать, используя приближенные методы интегрирования (например, с помощью формулы трапеций).

В формализованном виде решение задачи поэтапно заключается в следующем.

В дальнейшем изложении вместо обозначения «первый (второй) тяжелый металл» будем пользоваться обозначением «первый (второй) элемент». При этом под выражениями  $f_{u1}(\varphi)$  и  $f_{u2}(\varphi)$  будем подразумевать задание функции кривой интенсивности инверсии первого (второго) элемента в табличном виде.

Для обнаружения присутствия первого и второго элементов в анализируемой пробе находим все минимумы и максимумы кривой

интенсивности инверсии двух тяжелых металлов в пробе (представленной в табличном виде) в пределах  $[\varphi_H, \varphi_K]$ , где  $\varphi_H$  и  $\varphi_K$  — потенциалы начала и окончания процесса измерения.

Точки минимумов:

$(\varphi_H, y_H)$  — потенциал начала процесса измерения и начальное значение кривой интенсивности инверсии соответственно;

$(\varphi_{m1}, y_{m1})$  — потенциал первого минимума и значение первого минимума кривой интенсивности инверсии соответственно;

$(\varphi_{m2}, y_{m2})$  — потенциал второго минимума и значение второго минимума кривой интенсивности инверсии соответственно.

Точки максимумов:

$(\varphi_{01}, H_1)$  — потенциал первого максимума и значение первого максимума кривой интенсивности инверсии соответственно;

$(\varphi_{02}, H_2)$  — потенциал второго максимума и значение второго максимума кривой интенсивности инверсии соответственно;

$(\varphi_K, y_K)$  — потенциал окончания процесса измерения и конечное значение интенсивности инверсии соответственно.

Затем для найденного потенциала пика интенсивности инверсии первого элемента  $\varphi_{01}$  устанавливаем тип элемента и диапазон потенциалов его инверсии  $[\varphi_{a1}, \varphi_{b1}]$ . Аналогично для найденного потенциала пика интенсивности инверсии второго элемента  $\varphi_{02}$  устанавливаем тип элемента и диапазон потенциалов его инверсии  $[\varphi_{a2}, \varphi_{b2}]$ . По полученным результатам находим пределы  $[\varphi_{a2}, \varphi_{b1}]$  перекрытия потенциалов первого и второго элементов.

В соответствии с рис. 1 определяем величину  $y_{01} = h_{a1} = y(\varphi_{a1})$  по установленному ранее значению потенциала начала инверсии первого элемента  $\varphi_{a1}$ .

Для определения времени инверсии, соответствующего левой стороне графика кривой интенсивности инверсии первого элемента  $t'_1$ , используем соотношение

$$t'_1 = \int_{\varphi_{a1}}^{\varphi_{a2}} f_{a1}(\varphi) d\varphi.$$

Для того чтобы получить прогнозируемые табличные данные скрытой части правой стороны указанного графика в диапазоне потенциалов  $[\varphi_{a2}, \varphi_{b1}]$ , будем искать скрытую часть правой стороны указанного графика в виде экстраполяционной прямой

$$y_{\varphi 1}(\varphi) = a'_{\varphi 1} \cdot \varphi + b_{\varphi 1}, \quad (1)$$

где коэффициенты  $a'_{\varphi 1}$  и  $b_{\varphi 1}$  определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} a'_{\varphi 1} &= \frac{y_{a2} - y_{01}}{\varphi_{a2} - \varphi_{b1}} = \frac{y'_{a2}}{\varphi_{a2} - \varphi_{b1}}, \\ b_{\varphi 1} &= -\frac{y'_{a2} \cdot \varphi_{b1}}{\varphi_{a2} - \varphi_{b1}} + y_{01}. \end{aligned} \quad (2)$$

Далее недостающие прогнозируемые табличные данные скрытой части правой стороны указанного графика в диапазоне потенциалов  $[\varphi_{a2}, \varphi_{b1}]$  получаются с помощью выражения (1) с использованием выражения (2).

Для определения времени инверсии, соответствующего правой стороне графика кривой интенсивности инверсии первого элемента  $t''_1$ , используем соотношение

$$t''_1 = \int_{\varphi_{a2}}^{\varphi_{b1}} y_{\varphi 1}(\varphi) d\varphi.$$

В результате полное время инверсии первого элемента равно

$$t_1 = t'_1 + t''_1.$$

Для определения прогнозируемых табличных данных скрытой части левой стороны графика кривой интенсивности инверсии второго элемента  $t'_2$  с помощью выражения (1) находим значения  $y_{\varphi 2}(\varphi)$  из выражения

$$y_{\varphi 2}(\varphi) = y(\varphi) - y_{\varphi 1}(\varphi) \quad (3)$$

в пределах  $[\varphi_{a2}, \varphi_{b1}]$  для второго элемента. Здесь  $y(\varphi)$  — исходные табличные данные левой стороны графика кривой интенсивности инверсии второго элемента в диапазоне потенциалов  $[\varphi_{a2}, \varphi_{b1}]$ .

После получения недостающих прогнозируемых табличных данных находим время инверсии соответствующее левой стороне указанного графика

$$t'_2 = \int_{\varphi_{a2}}^{\varphi_{b1}} y_{\varphi 2}(\varphi) d\varphi.$$

Для нахождения полного времени инверсии второго элемента требуется найти на кривой интенсивности инверсии второго элемента после максимума точку 3, которая соответствует моменту времени перехода инверсии второго элемента на скрытый участок. Для этого, используя ранее найденные точки максимума  $(\varphi_{02}, H_2)$  и минимума  $(\varphi_{m2}, y_{m2})$  правого участка инверсии второго элемента, находим уравнение секущей между этими точками

$$y_c(\varphi) = a_c \cdot \varphi + b_c, \quad (4)$$

где коэффициенты  $a_c$  и  $b_c$  определяются следующим образом:

$$a_c = \frac{H_2 - y_{m2}}{\varphi_{03} - \varphi_{m2}}, \quad (5)$$

$$b_c = y_{m3} - a_c \cdot \varphi_{m2}.$$

Далее из решения уравнения

$$y(\varphi) - y_c(\varphi) = 0 \quad (6)$$

для диапазона потенциалов  $[\varphi_{02}, \varphi_{m2}]$  находятся координаты  $(\varphi_3, y_3)$  точки 3. Здесь  $y(\varphi)$  — исходные табличные данные правой стороны графика кривой интенсивности инверсии второго элемента в диапазоне потенциалов  $[\varphi_{02}, \varphi_{m2}]$ .

Для определения времени инверсии соответствующего правой стороне данного графика от точки 2 до точки 3 используем соотношение

$$t_2'' = \int_{\varphi_{b1}}^{\varphi_3} f_{u2}(\varphi) d\varphi.$$

Для того чтобы получить прогнозируемые табличные данные скрытой части правой стороны графика кривой интенсивности инверсии второго элемента в диапазоне потенциалов  $[\varphi_3, \varphi_{b2}]$ , будем искать скрытую часть правой стороны указанного графика в виде экстраполяционной прямой

$$y_{33}(\varphi) = a'_{33} \cdot \varphi + b_{33}, \quad (7)$$

где коэффициенты  $a'_{33}$  и  $b_{33}$  определяются следующим образом:

$$a'_{33} = \frac{y_{a3} - y_{01}}{\varphi_{a3} - \varphi_{b2}} = \frac{y'_{a3}}{\varphi_{a3} - \varphi_{b2}}, \quad (8)$$

$$b_{33} = -\frac{y'_{a3} \cdot \varphi_{b1}}{\varphi_{a3} - \varphi_{b2}} + y_{01}.$$

Далее недостающие прогнозируемые табличные данные скрытой части правой стороны указанного графика в диапазоне потенциалов  $[\varphi_3, \varphi_{b2}]$  вычисляем с помощью выражения (7) с использованием выражения (8).

Для определения времени инверсии, соответствующего правой стороне графика кривой интенсивности инверсии второго элемента  $t_2'''$ , используем соотношение

$$t_2''' = \int_{\varphi_3}^{\varphi_{b2}} y_{33}(\varphi) d\varphi.$$

Тогда полное время инверсии второго элемента равно

$$t_2 = t_2' + t_2'' + t_2'''.$$

Выше приведенное решение целесообразно обобщить в виде следующего алгоритма построения модели.

**Алгоритм.** Укажем наиболее важные этапы разработанного алгоритма, опуская второстепенные детали.

Этап 1. Находим все минимумы и максимумы кривой интенсивности инверсии тяжелых металлов 1 и 2 в пробе в пределах  $[\varphi_H, \varphi_K]$ , а именно: точки минимумов  $(\varphi_H, \gamma_H)$ ,  $(\varphi_{m1}, \gamma_{m1})$ ,  $(\varphi_{m2}, \gamma_{m2})$  и максимумов  $(\varphi_{01}, H_1)$ ,  $(\varphi_{02}, H_2)$ ,  $(\varphi_K, \gamma_K)$ .

Этап 2. Для найденного потенциала пика интенсивности инверсии первого элемента  $\varphi_{01}$  устанавливаем тип элемента и диапазон потенциалов его инверсии  $[\varphi_{a1}, \varphi_{b1}]$ .

Этап 3. Для найденного потенциала пика интенсивности инверсии второго элемента  $\varphi_{02}$  устанавливаем тип элемента и диапазон потенциалов его инверсии  $[\varphi_{a2}, \varphi_{b2}]$ .

Этап 4. Находим пределы перекрытия потенциалов элементов 1 и 2 —  $[\varphi_{a2}, \varphi_{b1}]$ .

Этап 5. Определяем величину  $y_{01} = h_{a1} = y(\varphi_{a1})$ .

Этап 6. Устанавливаем время  $t'_1$  путем приближенного интегрирования по данным фрагмента кривой интенсивности инверсии первого элемента в пределах  $[\varphi_{a1}, \varphi_{a2}]$ .

Этап 7. Находим коэффициенты  $a'_{\gamma 1}$ ,  $b_{\gamma 1}$  по формулам (1), (2) экстраполирующей прямой  $y_{\gamma 1}(\varphi)$  в пределах  $[\varphi_{a2}, \varphi_{b1}]$ .

Этап 8. Устанавливаем время  $t''_1$  путем приближенного интегрирования значений экстраполирующей прямой  $y_{\gamma 1}(\varphi)$  в пределах  $[\varphi_{a2}, \varphi_{b1}]$ .

Этап 9. Определяем полное время инверсии первого элемента

$$t_1 = t'_1 + t''_1.$$

Этап 10. Находим значения  $y_{\gamma 2}(\varphi)$  по формуле  $y_{\gamma 2}(\varphi) = y(\varphi) - y_{\gamma 1}(\varphi)$  (3) в пределах  $[\varphi_{a2}, \varphi_{b1}]$  для второго элемента.

Этап 11. Устанавливаем время  $t'_2$  путем приближенного интегрирования значений  $y_{\gamma 2}(\varphi)$  в пределах  $[\varphi_{a2}, \varphi_{b1}]$ .

Этап 12. Находим коэффициенты  $a_c$ ,  $b_c$  по формулам (4), (5) секущей  $y_c(\varphi)$  в пределах  $[\varphi_{02}, \varphi_{m2}]$  и точку пересечения  $(\varphi_3, \gamma_3)$  кривой интенсивности инверсии с секущей по формуле (6).

Этап 13. Определяем коэффициенты  $a_{\gamma 3}$ ,  $b_{\gamma 3}$  по формулам (7), (8) экстраполирующей прямой  $y_{\gamma 3}(\varphi)$  в пределах  $[\varphi_3, \varphi_{b2}]$ .

Этап 14. Устанавливаем время  $t''_2$  путем приближенного интегрирования по данным фрагмента кривой интенсивности инверсии второго элемента в пределах  $[\varphi_{b1}, \varphi_3]$ .

Этап 15. Определяем время  $t_2'''$  путем приближенного интегрирования значений экстраполирующей прямой  $y_{33}(\varphi)$  в пределах  $[\varphi_3, \varphi_{b2}]$ .

Этап 16. Находим полное время инверсии второго элемента

$$t_2 = t_2' + t_2'' + t_2'''.$$

Результатом выполненного исследования является разработанный приближенный алгоритм моделирования скрытых фрагментов инверсионно-хронопотенциометрического процесса совместного измерения массовой концентрации двух тяжелых металлов.

## Выводы

Задача построения алгоритма измерения концентрации каждого из двух тяжелых металлов, диапазоны инверсии которых перекрываются, может быть решена только при перечисленных ниже двух допущениях, а именно: характер протекания процессов инверсии каждого тяжелого металла остается неизменным; смещение концов каждой кривой интенсивности инверсии относительно оси ординат одинаково. Это позволяет обеспечить приближенное равенство между площадью под исходной кривой интенсивности инверсии и суммой площадей под модельными кривыми для участка совместной инверсии двух металлов.

Предлагаемый подход к построению алгоритма позволяет практически осуществить приближенное разделение массовой концентрации двух тяжелых металлов на участке их совместной инверсии и оценить количественное значение каждого металла как на участке их совместной инверсии, так и в пробе в целом.

Разработанный алгоритм позволяет оценить доли концентрации на скрытых участках кривой инверсии каждого из двух тяжелых металлов, что способствует повышению точности измерения концентрации каждого.

1. Моделирование инверсионно-хронопотенциометрического процесса измерения массовой концентрации отдельно взятого тяжелого металла / А.Э. Татаринев, И.В. Суровцев, О.В. Бабак // УСиМ. — 2012. — № 5. — С. 88–92.
2. Моделирование инверсионно-хронопотенциометрического процесса совместного измерения массовой концентрации двух тяжелых металлов / А.Э. Татаринев, И.В. Суровцев, О.В. Бабак // УСиМ. — 2013. — № 5. — С. 84–87.
3. Інверсійно-хронопотенціометричне визначення важких металів в об'єктах навколишнього середовища: Наук.-методич. розробка. / О.І. Карнаухов [та ін.] // — К. : УГУПТ, 1997. — 88 с.

Получено 17.02.2014

# Медицинская и биологическая кибернетика

УДК 574.2 + 51.001.572+ 616-006-085.277

## СИНХРОНИЗАЦИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ СРЕДОЙ С ПОЛНЫМ ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ КАК ОБОСНОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕОДНОРОДНОГО ПОЛЯ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ОБЛУЧЕНИИ ОПУХОЛЕЙ

Н.А. Николов<sup>1,2</sup>, П.П. Лошицкий<sup>1</sup>, А.Г.Соляр<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный технический университет Украины «КПИ»

<sup>2</sup>Государственный университет телекоммуникаций

На основе теории просачивания (перколяции) обоснован выбор пространственной неоднородности внешнего физического фактора, позволяющего повысить эффективную перфузию биологических тканей. Показано, что размеры кластеров (паттернов) пространственного распределения внешнего поля должны составлять от 5 до 45 % полезной площади (объема) облучения; количество кластеров — более трех.

**Ключевые слова:** пространственно-неоднородное поле, синхронизация, перфузия, перколяция, злокачественная опухоль.

На основі теорії перколяції обґрунтовано вибір просторової неоднорідності зовнішнього фізичного фактору, який дозволяє підвищити ефективну перфузію біологічних тканин. Показано, що загальні розміри кластерів (патернів) просторового розподілу зовнішнього поля повинні становити від 5 до 45 % корисної площі (об'єму) опромінення; кількість кластерів — більше трьох.

**Ключові слова:** просторово-неоднорідне поле, синхронізація, перфузія, перколяція, злоякісна пухлина.

## ВВЕДЕНИЕ

Условием выполнения гомеостатической функции биологической жидкости является практически идеальная перемешиваемость растворенных в ней компонентов, т.е. обеспечение синхронизации через среду [1]. Нарушение тканевого гомеостаза, синхронизации, нередко приводит к появлению и прогрессии злокачественных образований [2]. Для злокачественных новообразований характерно появление, по мере их развития, сложной неоднородной хаотической структуры, как на клеточном уровне, так и на тканевом. Несмотря на то, что развитие и строение опухолевой ткани подчиняется стохастической фрактальной логике, считается, что на расстояниях, существенно больших, чем размеры клеток, синхронизация исчезает. Отсутствие синхронизации приводит к появлению

многообразия опухолевых клеток по структуре и функциональной активности. В свою очередь, это делает злокачественные опухоли устойчивыми к химиолучевой терапии. Для повышения эффективности терапии опухолей и минимизации поражения здоровых тканей злокачественные клетки пытаются синхронизировать и перевести их в активную по функции фазу. Так, в лучевой терапии применяют радиосенсибилизаторы и радиопротекторы [3], в химиотерапии за несколько дней до введения основного цитотоксического вещества используют препараты, синхронизирующие клеточные циклы (Lampkin B.C. et al.) [1]. Однако применение подобных методов не всегда дает существенное повышение результатов терапии. Во многом это связано с крайне неравномерной перфузией опухолевых тканей биологическими жидкостями.

Одним из методов сенсibilизации биологических тканей, в том числе и опухолевых, является неравновесная умеренная электромагнитная гипертермия, не увеличивающая температуру более чем на 1,5 °С и не оказывающая прямого цитотоксического действия. Наряду с непосредственным взаимодействием электромагнитного поля со злокачественными клетками, существенно повышается внутриопухолевый кровоток, оксигинация опухоли, доставка химиотерапевтического препарата в очаг поражения. Однако и этот метод не обеспечивает полной синхронизации системы внешней средой. Об этом свидетельствуют, например, ультразвуковые изображения цветного Допплера карциномы Герена до и после электромагнитного облучения в работе [4]. Представленные данные иллюстрируют достаточно общее свойство злокачественных опухолей с геометрическим характерным размером более 1,5 см, что преимущественно кровеносные сосуды, питающие опухоль, сосредоточены на периферии новообразования. В модельном случае данную периферию можно представить как некоторую эффективную поверхность раздела сред. В объемной части опухоли также следует ожидать увеличение динамики движения биологических жидкостей, о чем свидетельствует увеличение эхогенности опухолевых тканей в В-режиме [4], но эти изменения не всегда выражены, и, возможно, поэтому далеко не всегда наблюдается регресс опухоли после химиотерапии. В работе [5] были показаны типичные изменения кровотока при умеренной электромагнитной гипертермии рака молочной железы. На основании этих исследований была выведена предварительная классификация ответной реакции кровоснабжения опухоли, которая позволяет в какой-то степени оценить эффективность терапии в целом: умеренные, средние и выраженные изменения кровотока [5]. Умеренные изменения соответствовали незначительному повышению систолического и диастолического кровотока менее чем в два раза и появлению небольшого количества цветных паттернов. Средние изменения соответствовали увеличению скорости кровотока более чем в два раза и появлению большого количества новых цветных паттернов. Выраженные изменения наблюдались при существенном увеличении скорости кровотока более чем в 40 раз и обязательном увеличении цветных паттернов. Предполагается, что чем более выражены изменения перфузии тканей после



электромагнитного облучения, тем больше вероятность повышения эффективности терапии.

Для повышения эффективной перфузии опухоли во время химиолучевой терапии было предложено использовать пространственно-неоднородное электромагнитное облучение опухоли [6–8]. В работе [6] теоретически обосновывается повышение противоопухолевых эффектов при пространственно-неоднородном электромагнитном облучении. Акцент в этой работе ставится на непосредственном действии внешнего физического фактора на метаболическую активность клеток. Однако, учитывая допущения модели, а также абстрактность термина «метаболическая активность», критерии выбора оптимальной неоднородности поля остаются дискуссионными.

В связи с этим целью данной работы является обоснование выбора наиболее эффективной пространственной неоднородности электромагнитного облучения опухоли при комплексной терапии, основываясь на изменении перфузии тканей.

### **СИНХРОНИЗАЦИЯ СИСТЕМ СРЕДОЙ С ДИФФУЗИОННЫМ ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ**

Как отмечалось ранее, каждый элементарный объем организма можно рассматривать как некоторый осциллятор, генератор, наделенный автономией, а биологические жидкости с растворенными в них веществами, формирующими среду, могут выступать в качестве синхронизирующего фактора. Если соблюдается условие идеального мгновенного перемешивания среды, то ее можно рассматривать как пространственно-однородное поле. В этом случае синхронизация генераторов со слабыми взаимными связями возможна, если концентрация управляющих физико-химических агентов значительна или существенно больше, чем генерация этих агентов самими генераторами. Полоса синхронизации, под которой следует понимать частотный диапазон автоколебаний в реакторе, диапазон концентраций управляющих метаболитов или интенсивности внешнего фактора, существенно расширяется при увеличении клеточных контактов (коэффициента взаимной связи). Для злокачественных опухолей характерно существенное увеличение дисперсии значений коэффициентов связи между ближайшими соседями [9]. Так, метастатическая способность опухолей определяется именно резким снижением сцепления клеток, но в то же время отдельные клетки могут «слипаться» между собой, образуя непосредственные контакты клеточных мембран [9, 10], способные в некоторых случаях приводить к полному объединению с образованием многоядерных клеток [10]. Увеличение клеточных контактов приводит к образованию ассоциата, и вероятность синхронизации жизненного цикла клеток, образующих этот ассоциат, возрастает, проявляется кластерная структура опухоли. Однако радиус синхронизации или радиус корреляции таких кластеров существенно меньше, чем размеры самой опухоли.

При рассмотрении среды с диффузией, т.е. при учете наличия некоторой инерционности, основное влияние на автоколебания реакторов оказывают преимущественно ближайшие соседние реакторы. Средний корреляционный

радиус или «функция влияния» уменьшается в  $e$  раз на расстояниях  $\bar{s}$  :

$$\bar{s} \approx \sqrt{2D/\omega_c}, \quad (1)$$

где  $D$  — коэффициент диффузии управляющего параметра (реагента/метаболита),  $\omega_c$  — синхронная частота генерации управляющего параметра генераторами. Для ферментативных реакций типа гликолиза  $\bar{s} \sim 10^{-2}$  см, для темновых реакций фотосинтеза  $\bar{s} \sim 10^{-1}$  см [1].

Пространственный радиус синхронизации может быть существенно увеличен, если в реакторы генерируют два и более метаболита, имеющих различные диффузионные свойства. Отношение концентраций данных метаболитов определяет степень когерентности реакторов. Подобные модели, например, хорошо описывают раскраску шкуры/шерсти животных [11]. Для злокачественных опухолей такими метаболитами могут выступать факторы роста [12, 13]. На сегодняшний день пока нет достоверных данных, какие факторы роста опухолей могут конкурировать между собой, задавая тем самым кластерную структуру. Обычно каждый фактор роста рассматривается в отдельности [13]. Кроме того, поскольку злокачественные новообразования характеризуются крайне неоднородной структурой, диффузионная подвижность молекул в различных направлениях будет отличной. Поэтому макроскопическая синхронизация, которую можно описать моделями Марри, маловероятна.

Следует ожидать, что при хронических процессах размеры синхронных кластеров будут соответствовать и морфологическим структурам. При этом было показано, что полоса синхронизации при фиксированном общем числе реакторов  $n$  в случае среды с полным внутренним перемешиванием в  $n$  раз больше полосы среды с диффузией. Синхронизация реакторов со средой с диффузией соответствует случаю, когда управляющий реагент генерируется самим реактором; с полным перемешиванием — внешним фактором, например эндокринной системой или химиопрепаратом при его введении в системный кровоток.

Таким образом, если в качестве управляющего параметра синхронизации распределенной системы выбрать электромагнитное поле, не вызывающее выраженных тепловых эффектов, приводящее к стрессу и гибели клеток, увеличение радиуса синхронизации клеток можно объяснить повышением диффузионной способности компонентов биологической жидкости. Геометрические размеры кластеров синхронизации составляют порядка миллиметров.

#### **ОЦЕНКА НАИБОЛЕЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ПРОСАЧИВАНИЯ (ПЕРКОЛЯЦИИ)**

Термин «перколяция» использовался для противопоставления диффузии: если в случае диффузии рассматривают случайное блуждание частиц, то в случае перколяции речь идет о направленном движении (например, течение жидкости или тока) в случайной среде [14].

Термин «перколяция» (percolation — англ.) уже установился в

отечественной литературе, однако он имеет эквивалент в русскоязычной литературе — «просачивание», «протекание» [15].

Обеспечение тканей биологическими жидкостями осуществляется кровеносными и лимфатическими сосудами, капиллярами. Тем не менее, повышение объема циркулирующей жидкости в них еще не означает ее проникновения в ткани. Скорость потока жидкости в сосудах существенно отличается от скоростных параметров циркуляции жидкости в межклеточном пространстве. В связи с этим вводят понятие эффективного кровоснабжения органов и тканей — перфузию. Большинство моделей перфузии биологических тканей основаны на диффузионных моделях [16]. Как известно, диффузия, первоисследователем которой был А. Фик, — это процесс взаимного проникновения молекул или атомов одного вещества между молекулами или атомами другого, приводящий к самопроизвольному выравниванию их концентраций по всему занимаемому объёму. Процесс диффузии определяется случайным, броуновским, характером движения частиц и является бесконечным во времени и пространстве. При этом следует отметить, что броуновское движение частиц, наблюдаемое на плоскости, существенно отлично от соответствующего поведения в объеме. Напротив, случайность процесса перколяции связана со средой, и существует порог, ниже которого процесс перколяции ограничен конечными областями или кластерами. Другими словами диффузионный фронт от источника описывается не гладкой функцией, как это предусматривает идеализированная диффузия, и где используют достаточно сильное пространственно-временное усреднение, а фрактальную кластерную структуру [14, 17]. Наличие проводимости, или в нашем случае проявление перфузионных процессов тканей, перколяции, начинается после появления некоторого критического количества кластерных структур. Причем процесс перколяции имеет пороговый характер.

Для обеспечения направленной диффузии и увеличения эффективной перфузии тканей, структуру перколяционных кластеров возможно сформировать при помощи внешнего электромагнитного поля. Пространственно-распределенное электромагнитное поле после трансформации его энергии в механические напряжения и температуру создает соответствующее поле гидростатических напряжений. Какое с этой точки зрения должно иметь пространственное распределение электромагнитное поле?

Известно, что количество и размер перколяционных кластеров зависит от вида пористой структуры тканей, т.е. в модельном случае от типа решетки. Для некоторых, самых типичных и простых решеток (квадратная, дерево Кейли, «галстук-бабочка», шестигранная) такие соотношения были получены [14]. Критическая вероятность ( $p_c$ ) появления перколяции для них находится в диапазоне от 0,3 до 0,7. Поскольку злокачественные опухоли имеют неоднородную структуру, имеет смысл оценить размеры и количество кластеров для ансамбля  $p_c$ . Интересующие нас соотношения имеют вид [14]

$$\sum_s n_s(p) \propto |p - p_c|^{2-\alpha}, \quad (2)$$

$$S(p) = \sum_s s^2 n_s(p) \propto |p - p_c|^\gamma, \quad (3)$$

где  $S$  — размер кластера,  $n_s(p)$  — распределение кластеров по размерам,  $p$  — вероятность перколяции (протекания),  $p_c$  — критическое значение вероятности перколяции,  $sn_s(p)$  — количество занятых ячеек, принадлежащих кластерам размера  $s$ ,  $\alpha$  и  $\gamma$  — некоторые параметры.

Значения параметров  $\alpha$  и  $\gamma$  в уравнениях (2) и (3) являются универсальными, не зависящими от вида решетки, типа перколяции, и зависят только от размерности пространства (табл. 1). Критические показатели связаны между собой соотношениями

$$\alpha = 2 - dv = 2 - 2\beta - \gamma, \quad \delta = \frac{\gamma}{\beta} + 1, \quad (4)$$

$$\eta = 2 - \frac{\gamma}{\nu}, \quad 2\beta + \gamma = \nu d,$$

где  $d$  — размерность пространства;  $\beta$ ,  $\delta$ ,  $\eta$ ,  $\nu$  — некоторые параметры.

**Таблица 1**

*Значения критических параметров соотношений (2) и (3) [14]*

Параметры	Размерность пространства				
	$d = 2$	$d = 3$	$d = 4$	$d = 5$	$d \geq 6$
$\beta$	5/36	0,417 ± 0,003	0,5	0,7	1
$\nu$	4/3	0,875 ± 0,008	0,7	0,6	1/2
$\gamma$	43/18	1,795 ± 0,005	1,8	1,6	1

Результаты численного моделирования представлены на рис. 1.

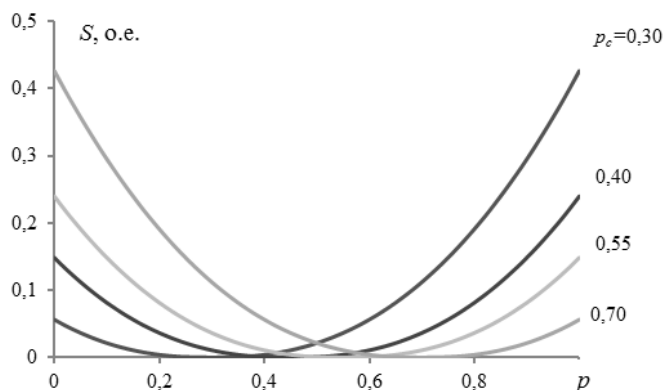


Рис. 1. Распределение кластеров по средним размерам в зависимости от критического значения вероятности перколяции

Анализ рис. 1 показывает, что геометрические размеры кластеров для обеспечения эффективной перфузии тканей находятся в диапазоне от 0,05 до 0,45 о.е. Данная оценка произведена из условия  $p \rightarrow 1$ , которое строго

определяет, что произойдет «пробой», в контексте данной статьи — «синхронизация», для биологических тканей — увеличение перфузии. Для электромагнитного облучения злокачественных опухолей, например рака молочной железы, полезная площадь облучения составляет порядка 5–10 см<sup>2</sup>. Это обусловлено геометрическими размерами новообразования, а также необходимостью облучать ближайшее окружение опухоли. Исходя из представленных оценок, геометрические размеры кластеров (паттернов) внешнего электромагнитного поля целесообразно выбирать в пределах 0,25–4,5 см<sup>2</sup>.

#### **ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПЕРФУЗИИ ПРИ ДЕЙСТВИИ ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕОДНОРОДНОГО ВНЕШНЕГО ФИЗИЧЕСКОГО ФАКТОРА**

Изменение эффективной перфузии под действием внешнего физического фактора (ВФФ) производилось на основе имитационного моделирования. Рассматривалось двумерное пространство. Биологическая ткань моделировалась как равномерная прямоугольная решетка размерами 300 x 300 пикселей. Исходное состояние матрицы нулевое. Области, где значение ячеек принималось равным единице, моделировали кровеносные сосуды. Общая площадь сосудов составляла 5 % от всей матрицы (4 500 пикселей). Сосуды, количество которых  $N_c$ , выбирались равной площади. Варьировалось количество сосудов, место расположения которых выбиралось случайным образом. Постоянство общей площади сосудов, независимо от их количества, характеризует фиксированный объемный кровоток. Проникновение жидкости из сосудов в межклеточное пространство (узлы решетки) происходило от крайних точек, значение которых было равно 1, со скоростью, пропорциональной коэффициенту диффузии  $D$  в точке в данный момент времени. Без ВФФ коэффициент  $D$  принимался равномерным в пространстве. Это означает, что за единицу времени (одну итерацию) жидкость может просочиться на максимальное расстояние:

$$l_1 = k_1 D, \quad (5)$$

где  $k_1$  — некоторая константа.

Направление просачивания  $\bar{e}_{\text{rand}}$  выбиралось по случайному равномерному закону распределения с учетом предыстории. Под предысторией понимается зависимость направления просачивания от предыдущего момента времени. В данной работе коэффициент памяти по направлению составлял 0,2 вероятности от предыдущего шага  $\bar{e}_{(t-1)}$ .

В зависимости от интенсивности ВФФ изменяется коэффициент диффузии, в частности, за счет температуры  $T$ :

$$D = D_0 \exp(-k_2 / T) + k_3. \quad (6)$$

где  $D_0$  — предельное значение коэффициента диффузии;  $k_2$ ,  $k_3$  — некоторые константы.

Наличие градиента температуры, распределение которой соответствовало распределению ВФФ, смещало вероятность просачивания в

сторону повышения  $T$  с одной стороны, и с другой — увеличивало максимальное расстояние просачивания на  $l_2$  за единицу времени:

$$\bar{\mathbf{e}}_{\text{grad}} = k_4 D \frac{\partial T}{\partial \mathbf{X}}, \quad (7)$$

$$l_2 = k_5 D \left| \frac{\partial T}{\partial \mathbf{X}} \right|,$$

где  $\frac{\partial T}{\partial \mathbf{X}}$  — градиент по направлению  $\mathbf{X}(x,y)$ .

Таким образом, суммарное направление просачивания определялось вектором

$$\bar{\mathbf{e}} = \bar{\mathbf{e}}_{\text{rand}} + \bar{\mathbf{e}}_{\text{grad}} + \bar{\mathbf{e}}_{(t-1)}. \quad (8)$$

Максимальное расстояние просачивания за единицу времени:

$$l = l_1 + l_2. \quad (9)$$

Максимальная амплитуда ВФФ составляла 1. Пространственно-неоднородное поле задавалось квазисинусоидальным законом распределения

$$a_x = \sin(xN_T), \quad a_y = \sin(yN_T), \quad (10)$$

$$T(x,y) = k_T \sqrt{a_x^2 + a_y^2}, \quad (11)$$

где  $N_T$  — параметр, характеризующий количество максимумов поля вдоль одной из осей  $x$  или  $y$ ,  $k_T$  — некоторая константа. Пространственная периодичность ВФФ позволяет достаточно однозначно характеризовать степень неоднородности поля одним числом —  $N_T$ .

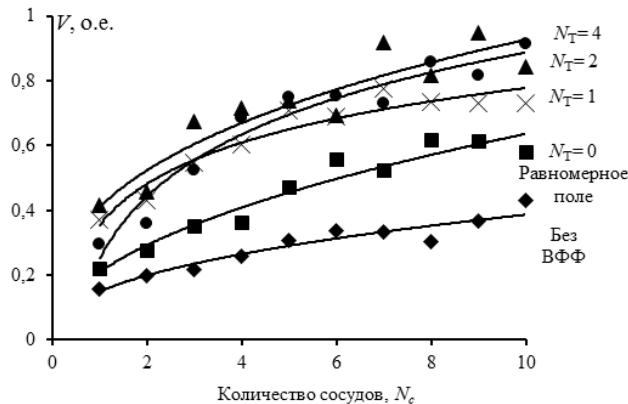


Рис. 2. Изменение объема эффективной перфузии ткани в зависимости от количества кровеносных сосудов. Функция аппроксимации имеет вид  $y = a \ln(x) + b$

Эффективная перфузия тканей ( $V$ ) оценивалась по степени заполнения исходной решетки (матрицы) за фиксированное время.

Основные результаты имитационного моделирования за фиксированное время при фиксированном объеме кровотока представлены на рис. 2 и 3.

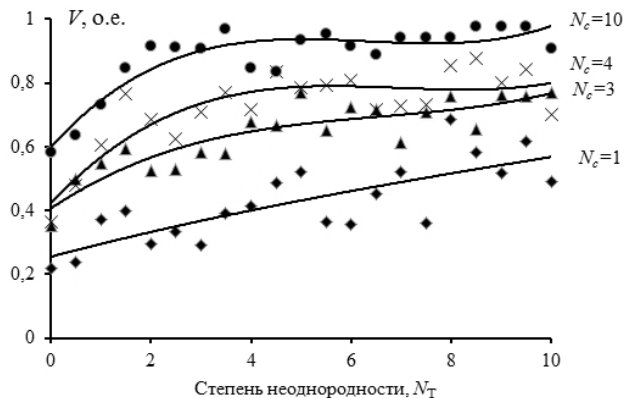


Рис. 3. Изменение объема эффективной перфузии ткани в зависимости от степени пространственной неоднородности ВФФ. Функция аппроксимации – кубический полином

Анализ представленных данных характеризует следующее. При фиксированном объемном кровотоке увеличение количества сосудов (рис. 2) по квазилогарифмическому закону увеличивает эффективную перфузию тканей (нижний предел квадрата коэффициента корреляции аппроксимирующей функции с расчетными данными:  $r^2 = 0,85$ ). Это подтверждает пилотную классификацию эффективности умеренной радиочастотной гипертермии по данным ультразвукового исследования в ВС-режиме [5], за исключением случая резкого повышения кровотока в конкретном сосуде без увеличения количества визуализируемых сосудов (цветовых паттернов). Данное исключение объясняется тем, что увеличение кровотока в одиночном сосуде неоднозначно характеризует повышение перфузии тканей: поток крови может проходить транзитом через опухоль с минимальными эффектами просачивания в межклеточное пространство. При увеличении пространственной неоднородности поля ВФФ эффективная перфузия увеличивается (рис. 3). При неоднородности поля  $N_T > 2 \div 3$  перфузия изменяется незначительно и соответствующие кривые выходят на «плато». Здесь исключение составляет случай одиночного крупного сосуда ( $N_c = 1$ ), где перфузия квазилинейно возрастает от степени неоднородности  $N_T$ . Для количественной оценки данных на рис. 3 использовалась аппроксимация вида  $-\ln(1 - y) = \lambda x + b$ , результаты которой представлены в табл. 2.

Данные в табл. 2 свидетельствуют, что с увеличением пространственной неоднородности ВФФ, характеризуемой параметром  $N_T$ , эффективная перфузия тканей повышается по квазиэкспоненциальной зависимости. Увеличение количества приводит к увеличению параметра  $\lambda$  (уменьшение постоянной времени  $\tau = 1 / \lambda$ ). Так, в нашем модельном случае при фиксированном объемном кровотоке постоянная времени  $\tau$  при  $N_c = 5$  меньше, чем при  $N_c = 1$  более чем 3,5 раза.

Графические зависимости на рис. 2 и 3 демонстрируют некоторый колебательный режим расчетных точек по отношению к линиям тренда. В

большой степени именно это обуславливает пониженные значения коэффициентов корреляции  $r^2$  в табл. 2. Объясняются данные флуктуации наличием в имитационном моделировании случайных составляющих, влиянием округления значения площади сосуда при конечном дискретном пространстве, а так же тем, что пространственное расположение модельных сосудов «синхронизировано» с пространственным распределением ВФФ. Другими словами, для каждого варианта расположения сосудов имеется свой локальный оптимум при некоторых значениях  $N_T$ .

**Таблица 2**

*Параметры аппроксимации данных на рис. 3 функцией  $-\ln(1-y) = \lambda x + b$*

Количество сосудов $N_c$	Параметры уравнения $\lambda x + b$ , где $x$ — степень неоднородности $N_T$	Квадрат коэффициента корреляции $r^2$
1	$0,0562 x + 0,2953$	0,65
3	$0,0819 x + 0,6555$	0,72
4	$0,0898 x + 0,9167$	0,51
5	$0,1980 x + 1,4892$	0,58

Следует так же отметить, что при рассмотрении пространственной задачи в случае глубокого расположения опухоли повышение неоднородности поля ВФФ в непосредственной близости от излучателя увеличивает однородность поля с увеличением расстояния. Исходя из этого, наиболее эффективное пространственное распределение поля ВФФ соответствует случаю  $N_T = 2 \div 3$ .

С точки зрения имитационного моделирования следует так же отметить некоторую конкуренцию интенсивности шума, которая моделировала вероятность случайных блужданий  $\bar{\epsilon}_{\text{rand}}$ , и направленной перфузии (перколяцией)  $\bar{\epsilon}_{\text{grad}}$ : при вероятности протекания в случайном направлении ( $p_{\text{rand}}$ ), существенно меньшей вероятности перемещения по градиенту поля ( $p_{\text{grad}}$ ), эффективная перфузия резко снижается. Другими словами, градиентное поле ВФФ не должно однозначно задавать направление движения жидкости, а лишь смещать в ту или иную сторону вероятность протекания.

Экспериментально прямое подтверждение увеличения эффективной перфузии опухоли и удержание препарата в межклеточном пространстве при умеренной гипертермии с пространственно-неоднородным электромагнитным полем было показано в работе [18].

## **Выводы**

На основе теории синхронизации клеток средой с перемешиванием оценка нижнего порога размера пространственных кластеров (паттернов) внешнего физического фактора как синергетической составляющей комплексной терапии злокачественных опухолей составляет порядка 0,1 см.

Наиболее эффективные размеры кластеров пространственного распределения поля составляют от 5 до 45 % полезной площади (объема) облучения. Для опухолей с характерными геометрическими размерами 5–10 см<sup>2</sup> с учетом зоны инвазии это соответствует размерам кластеров внешнего электромагнитного поля в пределах 0,25–4,5 см<sup>2</sup>.



Данные имитационного моделирования влияния пространственно-неоднородного внешнего физического фактора на эффективную перфузию биологических тканей и опухоли свидетельствуют о необходимости выбирать распределение поля, имеющее 2–3 максимума и минимума в полезной области облучения. Количество экстремумов пространственного распределения поля в данной прикладной задаче характеризуют количество кластеров.

1. Романовский Ю.М. Математическое моделирование в биофизике / Ю.М. Романовский, Н.В. Степанова, Д.С. Чернавский. — М. : Наука, 1975. — 344 с.
2. Черезов А.Е. Общая теория рака: тканевый подход / А.Е. Черезов. — М. : Изд-во МГУ, 1997. — 252 с.
3. Вибрані лекції з радіонуклідної діагностики та променевої терапії: навчальний посібник / за ред. А.П. Лазаря. — Вінниця : Нова книга, 2006. — 200 с.
4. Радиочастотная гипертермия злокачественных новообразований, нанотехнологии и динамический хаос / В.Э. Орел [и др.]. — Тернополь : ТГМУ, 2012. — 448 с.
5. Ультразвукова візуалізація підвищення внутрішньопухлинного кровотоку у хворих на рак грудної залози під впливом локальної радіочастотної гіпертермії / В.Е. Орел [та інш.] // Променева діагностика, променева терапія. — 2011. — № 3/4. — С. 43–47.
6. Николов Н.А. Математическое моделирование роста злокачественных новообразований под синергетическим действием пространственно-неоднородного внешнего физического фактора и химиотерапевтического препарата / Н.А. Николов, Т.В. Донскова // Электроника и связь. Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии». — 2010. — Т. 55, № 2. — С. 142–146.
7. Влияние неоднородности электромагнитного поля на усиление противоопухолевой активности доксорубина / В.Э. Орел [и др.] // Электроника и связь. — 2008. — № 3–4. — С. 173–177.
8. Вплив просторово-неоднорідного електромагнітного поля на протипухлинну активність цисплатину при дії на резистентний до нього під штам карциноми легені «Льюїс» / В.Е. Орел [та інш.] // УРЖ. — 2009. — Т. 17. — С. 72–77.
9. Маленко А.Г. Межклеточные контакты и реакции ткани / А.Г. Маленко, Г.А. Чуич. — М. : «Медицина», 1979. — 136 с.
10. Васильев Ю.М. Клетка как архитектурное чудо. Часть 3. Клетка единая, но делимая / Ю.М. Васильев // Соросовский образовательный журнал. — 1999. — № 8. — С. 18–23.
11. Марри Дж. Нелинейные дифференциальные уравнения в биологии. Лекции о моделях / Дж. Марри. — М. : Мир, 1983. — 398 с.
12. Биохимия человека: в 2 т. / Р. Марри, Д. Греннер, П. Мейес, В.М. Родуэлл. — М. : Мир, 1994. — Т. 2. — 415 с.
13. Факторы роста. Группа компаний «БиоХимМак» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://laboratory.rusmedserv.com/files/39\\_Factory\\_Rosta.pdf](http://laboratory.rusmedserv.com/files/39_Factory_Rosta.pdf) (дата обращения: 16.01.2014).
14. Тарасевич Ю.Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы: Учебное пособие / Ю.Ю. Тарасевич. — М. : Едиториал УРСС, 2002. — 112 с.
15. Кестен Х. Теория просачивания для математиков / Х. Кестен. — М. : Мир, 1986. — 392 с.
16. Биоритмические и самоорганизационные процессы в сердечно-сосудистой системе. Теоретические исследования и практическое значение / отв. ред. В.А. Антоненц, А.П. Матусова. — Н. Новгород : ИПФ РАН, 1992. — 220 с.
17. Федер Е. Фракталы / Е. Федер. — М. : Мир, 1991. — 254 с.
18. Ніколов М.О. Експериментальна оцінка зміни кінетики  $^{99m}\text{Tc}$ -МБІ в карциносаркомі Уокер-256 під впливом просторово-неоднорідного електромагнітного поля / М.О. Ніколов // УРЖ. Матеріали IV з'їзду Українського товариства фахівців з ядерної медицини. 26–27 вересня 2011 р., Одеса, 2011. — Т. XIX, вип. 3. — С. 312–315.

Получено 17.01.2014

## MONITORING AND CORRECTION OF STUDENTS' FUNCTIONAL STATE BY THE INFORMATION TECHNOLOGY TOOLS

L.M. Kozak<sup>1</sup>, M.V. Lukashenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *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*

<sup>2</sup> *Vinnitsya Medical College Named after Academician D.K. Zabolotny*

Приведены результаты анализа информационной технологии (ИТ) мониторинга и коррекции функционального состояния студентов в процессе обучения, созданной на основе разработанных моделей, комплекса критериев классификации составляющих моделей, алгоритмов определения нормализованных оценок, формирования групп и программ психологического сопровождения. ИТ включает три этапа: мониторинг функционального состояния, классификация этого состояния и на основе полученных оценок формирования групп и программ дифференцированного психологического сопровождения и проведение коррекции. На последнем этапе реализуется созданный конструктор психологических тренингов, позволяющий составить дифференцированные программы психологического сопровождения в соответствии с мозаикой состояния функций у исследуемых студентов. Завершается информационная технология повторным тестированием студентов и анализом результатов проведенной психологической коррекции.

**Ключевые слова:** информационная технология, функциональное состояние студентов, мониторинг и коррекция функционального состояния, программы психологической поддержки.

Надано результати аналізу інформаційної технології (ІТ) моніторингу і корекції функціонального стану студентів у процесі навчання, створеної на основі розроблених моделей, комплексу критеріїв класифікації станів складових моделей, алгоритмів визначення нормалізованих оцінок, формування груп і програм психологічного супроводу. ІТ включає три етапи: моніторинг функціонального стану, класифікація цього стану і на основі отриманих оцінок формування груп та програм диференційованого психологічного супроводу, проведення корекції. На останньому етапі реалізується створений конструктор психологічних тренінгів, що дозволяє скласти диференційовані програми психологічного супроводу відповідно до мозаїки стану різних функцій у досліджуваних студентів. Завершується інформаційна технологія повторним тестуванням студентів і аналізом результатів проведеної психологічної корекції.

**Ключові слова:** інформаційна технологія, функціональний стан студентів, моніторинг та корекція функціонального стану, програми психологічної підтримки.

### INTRODUCTION

The functioning of the educational system is aimed at the professional development of young people, the formation of highly qualified specialists in conjunction with the preservation of their health. The results of numerous studies of students' health testify to its deterioration and the related difficulty of the process of a personality social adaptation. In turn, the inadequacy of the socio-

psychological adaptation to the new conditions often as a positive feedback causes the occurrence of emotional instability and deteriorating health, entails the adaptive adjustment of a personality, resulted in both external and internal conflicts, as well as maladaptive behaviors [1].

For monitoring and correcting changes associated with admission to a higher educational institution planned work of the psychologist in higher education is conducted. Some students have nonspecific physiological and psychological adaptation reactions. Work arrangement with such students combines individual and team work aimed at preventing and correcting the negative effects of stress. The work of a school psychologist includes elements of psychotherapeutic approach for the analysis and overcoming psychological distress of a personality. The effect of external factors through a subjective estimation of their significance by a specific student is taken into account.

One of the most used approaches in the psychological service in education is a socio-psychological approach. The possibility of two kinds of age-related crises is taken into account — the crises of personal formation which may be accompanied by some significant life events (changes in social roles) as well as the crises caused by external causes (sudden changes in living conditions, social relations etc.) [2]. The change of the social status and environment resulting from admission to the high school at the age of 14–15 may be a factor of the crisis, which can cause a strong impuls to the personal development or disharmony. It is important to monitor student's functional states based on the physical and mental manifestations and reflecting their change in the learning process.

For a full and adequate assessment, monitoring and timely correction of students' functional state (FS) it is necessary to use new information technologies, the preparatory stage of which is the development of a functional state information model. This model displays all the components, their functions and parameters and is the basis for the formation of the complex of testing methods.

**The purpose** of this work is the analysis of information technology developed for monitoring the functional state of students to form differentiated programs of psychological support in the learning process.

## **INFORMATION SUPPORT OF INFORMATION TECHNOLOGY**

The basis of information technology (IT) is the formed information model of a student's functional state (IM) including the three main components: intellectual, emotional, and personality-motivational components. In our previous studies intellectual component has been analyzed and the biological functions that provide a cognitive mental processes has been singled out. These functions ensure forming environmental models, establishing links between these models, the ability to save and correcting these models, i.e. active cognitive activity, in solution of actual problems.

The main criterion for changes in the students' functional state is the decreased or increased effectiveness of the learning tasks, and a leading index of the active psychical functional state is the mental capacity, integrating basic mental functions — perception, attention, memory, and thinking. Therefore, the intellectual component is described by these specified system functions. The

characteristics of the functions are obtained by using known psycho diagnostic tests [3, 4].

We study the speed characteristics of perception arising from the action of simple visual and auditory signals, and the system characteristics of a higher level of perception — perception of time and space. To determine these parameters the registration time perception of simple sensorimotor reaction, modified test of Franz Halberg "individual minute" [5], measuring of the segment with predetermined length and its comparison with the real standard are used.

The main attention estimation parameters are the volume, concentration, stability, refocusing, which are determined by proofreading test.

The need to determine the current state of the memory function allows using the characteristics of short-term memory — the volume of stored and replicated information.

Depending on the involved elements and operations, it is proposed to determine thinking function by the attitudes of the abstract, associative, logical, operational, and spatial thinking.

The emotional component consists of three elements: the actual psychic experiences (internal emotional component), the manifestation of emotions (external emotional component) and changes in the functioning of the internal organs (component of physiological response). In this study we pay attention to two elements — impressive (inner feelings) and expressive (manifestation of emotions) functions. According to our classification each of these functions is represented by six characteristics in accordance with the basic feelings groups: safety, affection, self-esteem, activation, pleasure and feelings of affectation. These characteristics are determined by a designed questionnaire, included in an automated system [6]. As the system ability to generate internal and external manifestations of emotions the selected index of general emotional intensity is singled out. The difference between these two functions is represented by an emotional disbalance.

Another indicator of the emotional sphere imbalance is anxiety: resonal anxiety as a stable feature, reactive anxiety as an actual state [7]. We should take into account that the optimal level of anxiety is a natural and obligatory feature of an active person, but increased rates may cause stress, anxiety, disorders of attention and fine motor coordination.

The personality-motivational component combines functions of interpersonal relationships: conformity and nonconformity. These functions are marked by us based on T. Leary concept of interpersonal relationships [8] and L.N. Sobchik individually-typological approach [9].

The function of nonconformity is characterised by four trends (octants), to each of which is manifested by a certain style of interpersonal behavior: imperious-leading, independent-dominating, straight forward-aggressive, distrustful-skeptical. Octants of konformity function are: humble-shy, dependent-docile, cooperative-conventional, responsible-generous. When creating an information model two forms of "I-concept" are considered: "I-actual" — a self-image that most accurately characterizes the personality at the moment, and "I-ideal" — representation of oneself in accordance with the ideals and desires. Correlation between "I- actual" and "I-ideal" underlies personality adaptation mechanisms,

differences between these forms indicate the direction of the changes of functions in the personality-motivational component. Features of highlighted functions are determined by the test T. Leary adapted L.N. Sobchik as “Test of interpersonal relations” [9].

Information model is a hierarchical system: level I — integral (generalized) functional state assessment, each component (level II) is described by the corresponding system functions (level III) whose state is determined by one or more absolute and/or relative characteristics (level IV). The formed automated complex methods for quantitative characteristics of level IV are based on the developed information model.

#### **ALGORITHM TO DETERMINE THE RELATIVE FORMALIZED ASSESSMENTS OF THE FS**

The algorithm is based on a number of methodological approaches, including preprocessing data array, the normalizing indicators, and developing integral estimates [10–12]. Here are the stages of the proposed algorithm enlarged.

Stage I. Formation and qualitative analysis of the generalized initial dataset. In accordance with the information model a single table on entire dataset has been developed. Culling numerical values is carried out — excluding data that are artifacts or those remaining unchanged with the change of object state (from one class to another).

For further comparative analysis it is necessary to carry out the procedure of normalization and integration assessments formation.

Stage II . Normalization of indexes.

At the beginning of this stage the basic value is selected. This value can be obtained as follows:

— Calculated on the base of the original data set (average, maximum and minimum values, the lower and upper limits of the confidence interval);

— Defined as the norm for this index (from directories based on the age, sex and other characteristics);

— Adopted as a kind of "ideal" value of this index;

— Defined as the range of values that meets the criteria limits or range of primary data changes in the array.

The latest approach has been used for developing this information technology.

Using the selected reference/basic value, relative index defined as the ratio of the current value (in units) to the selected basic constant value (in units). The result is a dimensionless relative value.

To determine the range of variation index of 0 to 1 normalization procedure is performed using linear and nonlinear functions.

For linear normalization the following formulae are used:

$$D = \frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - x_{\min}} \quad \text{for decreasing the normalizing function;} \quad (1)$$

$$D = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad \text{for increasing the normalizing function} \quad (2)$$

where  $x_{\max}$ ,  $x_{\min}$ ,  $x_i$  are the maximum, minimum and current index undergoing normalization.

The normalized value of the index equal to 1 represents the best state of investigated characteristics. Increasing the value of the index at a decreasing normalization function indicates deterioration of the analyzed characteristics, and that with increasing function — an improvement of the state, and vice versa.

In nonlinear data normalization exponential (decreasing or increasing), arc tangent functions and distribution (normal, Weibull, Rayleigh, and others) are used.

To solve the tasks of our research it is important to single out the optimum values in normal range of investigated index, then the definition of normalized valuations must be done including the selected range:  $x_{-op} < x_i < x_{+op}$  where  $x_{+op}$  and  $x_{-op}$  are boundary values range of  $x_{op} + 10\%$ . So the normalized score is calculated:

$$D = \begin{cases} \frac{x_i - x_{+op}}{|x_{+op} - x_{\max}|} & x_i > x_{+op} \\ \frac{x_i - x_{-op}}{|x_{-op} - x_{\min}|} & x_i < x_{-op} \\ 1 & x_{+op} < x_i < x_{-op} \end{cases} \quad (3)$$

The values  $x_{\max}$ ,  $x_{\min}$  are determined from the conditions of the test task or of the confidence interval limits:  $x_{\min}, x_{\max} = \bar{x} \pm t_{\alpha, n} \sigma$  where  $\bar{x}$  is the arithmetic mean;  $\sigma$  is standard deviation;  $t$  is quantile of the Student distribution;  $\alpha$  is the level of significance;  $n$  is the number of freedom degrees.

Stage III. Forming integral assessments.

Mostly in medical and biological research calculating the arithmetic mean or the geometric mean of all received estimates is carried out to combine the received normalized indicators for integral evaluation. Each normalized index is assigned weight (using the peer review or largest variability indicators, etc.).

It is possible to calculate integral evaluation using a formula with the additional probabilities of weight of each indicator or calculation of additional probabilities averaged over the arithmetic mean or geometric mean.

Thus, in the first step normalized evaluation indices were calculated (level IV of the information model). Integral estimates of the following levels were calculated as a weighted average, combining the estimates of lower level: integrated assessment functions (level III) combines normalized index assessment (level IV), integral components assessment (level II) assesses the functions and integral (generalized) evaluation of the functional state (level I) combines integrated assessment of intellectual, emotional, and personality-motivational components.

The application integral indicators for the analysis of the functional state and its components allowed assigning a specific state of these systems quantitative assessment, to move from verbal to quantitative measures.

## **MONITORING THE STUDENTS' FUNCTIONAL STATE**

The study of the developed information model was conducted with the students of Vinnitsa Medical College named after academician D.K. Zabolotniy, two groups with different learning load were compared: group I is students of medical and biological lyceum and group II is students specializing in "Pharmacy".

Students' workload of medical and biological lyceum classes corresponds to 10–11 secondary school with advanced study of chemistry and biology, they choose speciality after two years of study. Pharmacy students (group II) have chosen their career before admission to college, they have three years training and high learning load.

Testing was conducted four times a year, at the beginning and the end of each two terms. The total volume of research is 218 people.

The experimental groups were homogeneous in terms of age: group I — 14–17 years old, group II — 14–18 years old (including three years of study). Results of the study indicate that the academic load affects all personality structure.

Analysis of the average group characteristics revealed differences in dynamics of the students' functional state in the two compared groups during the year. The first test (the beginning of the first semester) showed that the functional state of pharmacy students (group II) was worse than the students of lyceum (group I) in all components: the speed of simple sensorimotor reaction was lower, indicators of memory, thinking, emotional intensity and levels of emotional disbalance were lower, personal and reactive anxiety was elevated, the difference between the "I-actual" and "I-ideal" was increased, information profiles of conformity and nonconformity functions were different.

In the first terms students adapt to the new life rhythm and learning conditions/environments, and foundations of relationships with peers and teachers are formed. These processes are reflected in the functional state, their common feature is the change of attributes which indicate stress: heart rate was improved, rate of simple sensorimotor reaction, attention and memory indexes were increased. However, different workload entails various changes in the functional state of the students of the two analyzed groups. In particular this applies to emotional and personal-motivational components: emotional intensity of the students of group II was decreased, indexes of emotions of pleasure and activation were lowered, while indexes of affect feelings were increased, emotional disbalance has come down.

It is especially important to identify changes in the individual functional state of students. As these changes were present in all components of functional state in varying degrees the problems of the monitoring the state of each student and additional psychological support differentiated according to the results of this monitoring were arose. Preliminary studies of the dynamics of information model (functions, components and integral assessment of the students' functional state during the school year allowed to reveal temporal milestones, to point out

reduction of these indicators and to identify periods for additional psychological support.

The orientation of programs of differentiated psychological support was determined with regard to the specificity of intellectual, emotional, and personality-motivational components of the functional state. The need for specific training program was determined by the deterioration indexes of the functional state. Algorithm for the formation of groups of students, who were recommended to participate in the classes of specialized psychological support, was developed.

## **DATAWARE OF STUDENTS' FUNCTIONAL STATE CORRECTION IN THE LEARNING PROCESS**

The task of automating the formation of differentiated psychological support groups is solved by using the developed algorithm, which allows us to analyze the students' functional state based on a hierarchical information model. The analysis begins with an examination of the highest-level models — the level of integral assessment, and further the state of intellectual, emotional, and personality-motivational components and their functions are revealed step by step.

From the values of the integral assessment of the functional states ( $DF_i$ ) three classes of FS were singled out:

- Class  $F_1$  — good functional state at  $1 \geq DF_i > 0,66$ ;
- Class  $F_2$  — satisfactory functional state at  $0,66 \geq DF_i > 0,33$ ;
- Class  $F_3$  — unsatisfactory functional state at  $DF_i \leq 0,33$ .

In the first step of the algorithm each student was assigned according to the test results to one of these three classes of general functional state (FS is the highest level of information models).

Students, the general condition of which corresponds to the class  $F_1$  (good functional state), do not require additional psychological support and, consequently, are not included in further consideration.

In the second step of the algorithm calculation and analysis of assessments of intellectual ( $DI_i$ ), emotional ( $DE_i$ ) and personal-motivational ( $DL_i$ ) components are carried out taking into account the integrated assessment of the functional state ( $DF_i$ ). For dividing classes of these components state the system of criteria was formed, in tab. 1 criteria for determining the state of classes of intellectual component are shown.

In the second step three groups, singled out of the basis of deterioration of intellectual ( $F_2I_1, F_2I_2, F_2I_3, F_3I_1, F_3I_2, F_3I_3$ ), emotional ( $F_2E_1, F_2E_2, F_2E_3, F_3E_1, F_3E_2, F_3E_3$ ) and personal-motivational ( $F_2L_1, F_2L_2, F_2L_3, F_3L_1, F_3L_2, F_3L_3$ ) components with varying degrees of change in this state were revealed.

Good state of particular components, e.g. the intellectual component ( $I_1$ ), at satisfactory ( $F_2$ ) or unsatisfactory ( $F_3$ ) general functional state suggests that this deterioration of general functional state was due to negative changes in emotional and/or motivational areas. Therefore, students whose state is determined in classes  $F_2I_1, F_3I_1, F_2E_1, F_3E_1, F_2L_1$  and  $F_3L_1$ , will be assigned to groups focused on correction of deterioration in complementary components (in this case emotional and/or motivational) and their functions.



In the third step of the algorithm analysis of the next hierarchy level — analysis of the functions which provide the analyzed components — is carried out. To determine the state of particular functions the division into three classes is done based on the general principle of determining the limits of these classes: good ( $1 \geq X_i > 0,66$  where  $X_i$  is the normalized value of the analyzed function), satisfactory ( $0,66 \geq X_i > 0,33$ ) and unsatisfactory ( $X_i \leq 0,33$ ) functional state.

**Table 1**

*Criteria for determining the classes on normalized estimates of the state intellectual component*

Class indication	Class description	Class criteria
Intellectual component (IC)		
F <sub>2</sub> I <sub>1</sub>	IC good state IC, satisfactory general FS	$1 \geq DI_i > 0,66$ $0,66 \geq DF_i > 0,33$
F <sub>2</sub> I <sub>2</sub>	IP satisfactory state, satisfactory general FS	$0,66 \geq DI_i > 0,33$ $0,66 \geq DF_i > 0,33$
F <sub>2</sub> I <sub>3</sub>	IC unsatisfactory state, satisfactory general FS	$DI_i \leq 0,33$ $0,66 \geq DF_i > 0,33$
F <sub>3</sub> I <sub>1</sub>	IP good state, unsatisfactory general FS	$1 \geq DI_i > 0,66$ $DF_i \leq 0,33$
F <sub>3</sub> I <sub>2</sub>	IP satisfactory state, unsatisfactory general FS	$0,66 \geq DI_i > 0,33$ $DF_i \leq 0,33$
F <sub>3</sub> I <sub>3</sub>	IP unsatisfactory state, unsatisfactory general FS	$DI_i \leq 0,33$ $DF_i \leq 0,33$

For example, in the case of reducing intellectual indexes the problem of identification specific functions responsible for this deterioration is solved. And the psychologist knows that this particular student needs training of functions of attention, memory and/or thinking.

As a result of applying this algorithm three aggregated groups of additional psychological support are formed with a focus on intellectual, emotional and personality-motivational components. And definition of functions the state of which has been defined as unsatisfactory or satisfactory was done for each student.

## SET OF DIFFERENTIATED PROGRAMS FOR PSYCHOLOGICAL SUPPORT

Application of the algorithm, which allows classifying the FS of a particular students on monitoring results showed a variety of state combinations of different components and their functions in the students. To take into account these functional state mosaics in the preparation of differentiated programs of psychological support, we used the designer's approach. The elements of the developed set were trainings aimed at the intellectual, emotional, motivational aspects of psychical activities, using proven methods.

Functional training included the development of memory, basis of eidetic and efficient memorization, the development of attention, thinking, and creativity. Emotional state training control is aimed at developing the ability to determine the level of stress and causes of negative emotions, to exercise the self-analysis of behaviors in problematic situations, to acquaint with the way the negative emotions transformation, to develop patterns of behavior in intricate situations, to apply the technique of self-regulation, etc.

It is very important to carry out the conflict control training, giving information of the types and causes of conflict, types of conflicting personalities

and behaviors in conflict, the technology depreciation and conflict regulation, forming the ability to criticize constructively and to perceive criticism. The training of partner relations allows to achieve enhancement of the skills in communication, self-knowledge, the development of verbal and nonverbal manners of communication, constructive ways of interaction. The training of assertiveness promotes the development of skills of confident nonaggressive behavior, a clearer perception of their rights and opportunities with regard to the rights and aims of other people.

The perception of time has a stable relationship with other mental functions. On the one hand, all the senses (sight, hearing, and tactual sensation) give information about time. On the other hand, all the psychological functions unfold within time limits. Real perception of time is reflected subjectively in the sensations duration of all mental experiences/feelings [9]. So we involved a special group of time control training, aimed at developing the ability to plan and prioritize, set goals and effectively organize the fulfillment of work assignments, understanding the principles of the organization of effective self-control, methods and techniques of time management.

The elements of psychological training set are organized into three basic blocks of training: "Line of Intellect" aimed at correction of situational reducing the implementation of cognitive functions; "Line of Heart" determining the causes and conditions for reducing emotional imbalance, formation the skill of adequately feelings manifestation, identifying internal emotional resources to prevent chronic fatigue and emotional burnout; "Line of Life" recommended by the low assessments of the personal-motivational component, availability of character accentuation or potential internal conflict.

Using the developed psychological training set allowed us to form effecting by a program for each particular group of additional psychological support, taking into account the need to correct the state of certain functions of the intellectual, emotional or personality-motivational components. If necessary, in parallel with the team work individual counseling was carried out.

## **INFORMATION TECHNOLOGY OF MONITORING AND CORRECTION OF STUDENTS' FUNCTIONAL STATE**

Based on the developed models, a set of criteria classification, algorithms for determining the normalized estimates and forming groups of psychological support the information technology for monitoring and correction of students' functional state in the learning process was developed. Information technology includes three major stages: monitoring the functional state, the classification of this state and on the basis of obtained estimates formation of differentiated programs of psychological support and its correcting (Fig. 1).

*Monitoring the functional state (stage I).* At this stage the testing of students with the help of the developed automated system, which was based on the hierarchical structure of the functional state information model.

Indexes of intellectual and personal-motivational components are determined using proven methods of psycho-diagnostics, the characteristics of the emotional component are defined using our proposed classification of emotions, approach of

measuring expressive and impressive functions, the emotional saturation and emotional disbalance, as well as test method to determine them. According to the test results normalized assessments of all levels of the hierarchical information model were generated.

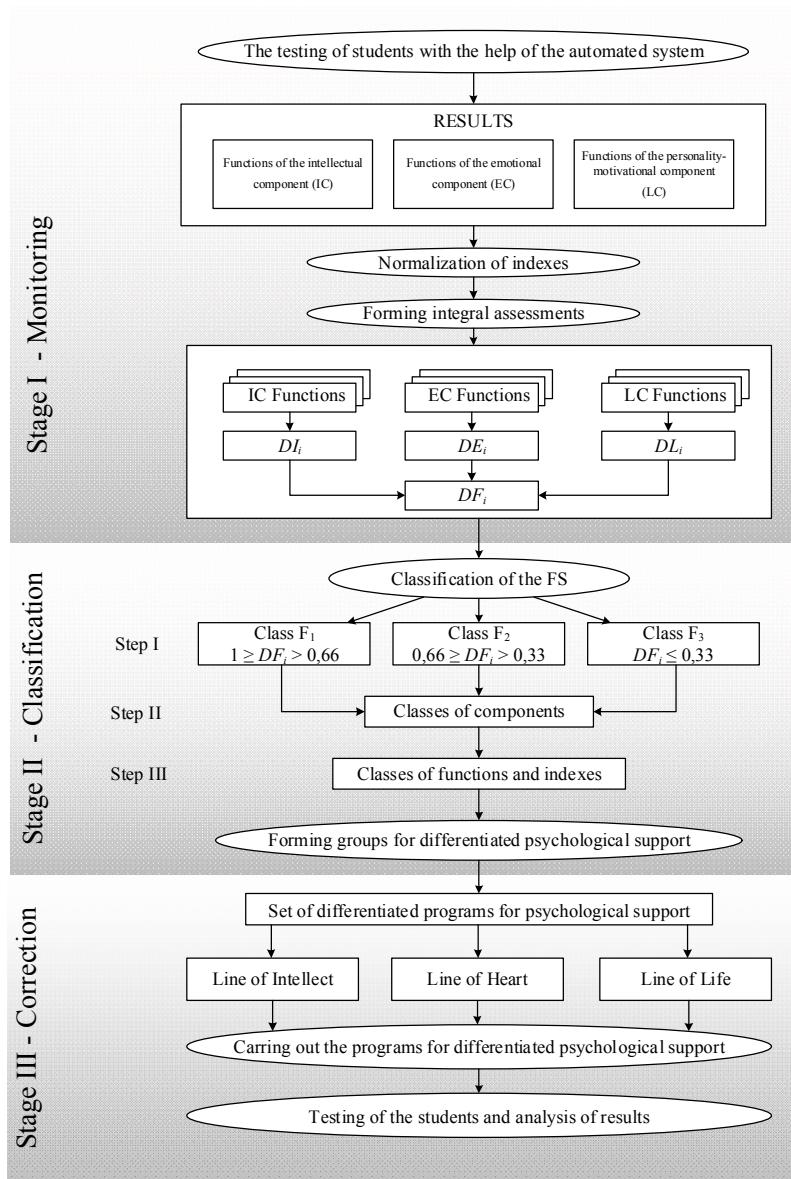


Fig. 1. Information technology of monitoring and correction of students' functional state

*Classification of the functional state (stage II).* Calculated integral FS assessments are input for classification the state of each student using the proposed set of criteria for classes of functional state.

The developed algorithm of formation the groups of additional mental accompaniment uses the results of the functional state classification, quantifies and verbal description of this state that allows us to include a particular individual to the appropriate group to participate in psychological training.

*Formation of differentiated psychological support programs and carrying out the correction of students' functional state (stage III).* At this stage, the created psychological training set is realized, which allows to make a differentiated program of psychological support in accordance with a combinations variety of different components and their functions states obtained for the studied students.

Work with students under formed programs lasts throughout the term, it is followed by testing of the participants of these programs and analysis of their functional state.

Application of the information technology in each term allows to correct and further maintain of the student's functional state at a good level, which increases the efficiency of the learning process.

## CONCLUSIONS

Monitoring functional status using the developed information technology can detect the need for additional psychological support. The results show a mosaic combination of psychological functions states that require correction forming the basis of the formation of differentiated programs of the psychologist's additional work. Evaluation of the results of the students' functional state correction indicates an improvement in functional reserves for the improve of the efficiency of the educational process.

1. Ильин Е.П. Эмоции и чувства // Е.П. Ильин — СПб. : Питер, 2011. — 783 p.
2. Банкрофт Дж. Вмешательство в кризис / Дж. Банкрофт // Введение в психотерапию. — Амстердам — К. : Сфера, 1997. — С. 116–135
3. Бурлачук Л.Ф. Словарь-справочник по психологической диагностике / Л.Ф. Бурлачук, С.М. Морозов. — К. : Наук. думка, 1989. — 200с.
4. Психологические тесты / под ред. А.А. Карелина : в 2 т. — М. : Гуманит. изд. центр ВЛАДОС, 2003. — Т. 1. — 312 с.
5. Autorhythmometry procedures for psychologie self-measurements and their analysis / F. Halberg, E.A. Johnson, W. Nelson, W. Runge, R. Sothem // *Physiol. Teacher*. — 1972. — No. 1. — P. 1–11.
6. Козак Л.М. Автоматизированная система определения характеристик интеллектуальной и эмоциональной составляющих психического статуса здоровья человека / Л.М. Козак, В.А. Елизаров // *Укр. журн. мед. техніки і технології*. — 1995. — № 3. — С. 59–66.
7. Хорни К. Тревожность. / К. Хорни : собр. соч. в 3 т. — М. : Смысл, 1997. Т.2. С. 174–180.
8. Leary T., Coffey I. Interpersonal diagnosis/Teories of Personality Investigation. / T. Leary, I. Coffey. New York, 1969. — Pp. 73–96.
9. Собчик Л.Н. Диагностика индивидуально-типологических свойств и межличностных отношений / Л.Н. Собчик. — СПб. : Речь, 2002. — 96 с.
10. Антомонов М.Ю. Формирование и использование интегральных характеристик функций, получаемых в медико-экологических исследованиях / М.Ю. Антомонов // *Український журнал медичної техніки і технології*. — 1998. — № 4. — С. 122–127.
11. Антомонов М.Ю. Математическая обработка и анализ медико-биологических данных / М.Ю. Антомонов. — К. : Малий друк, 2006. — 558с.
12. Биоэкология. Единое информационное пространство. — К. : Наук. думка, 2001. — 319 с.
13. Цуканов Б.И. Время в психике человека : монография / Б.И. Цуканов. — Одесса : Астропринт, 2000. — 220 с.

Получено 03.04.2014

UDC: 517.977.56

**ON PATHOLOGICAL SOLUTIONS TO  
AN OPTIMAL BOUNDARY CONTROL PROBLEM  
FOR LINEAR PARABOLIC EQUATION**

**S.O. Gorbonos, P.I. Kogut**

*Dnipropetrovsk National University Oles Honchar, Dnipropetrovsk, Ukraine*

**Introduction:** In this paper we study an optimal control problem associated to a linear parabolic equation with mixed Dirichlet-Neumann boundary conditions. We adopt as a control the measurable influence imposed on part of boundary. The optimal control problem is to minimize the discrepancy between a given distribution and the solution of the corresponding initial-boundary value problem. The characteristic feature of this problem is the fact that the matrix of coefficients in the main part of elliptic operator is non-symmetric and its skew-symmetric part is unbounded. As a result, the existence, uniqueness, and variational properties of the weak solutions to such problems usually are drastically different from the corresponding properties of solutions to the parabolic problem with bounded matrices in coefficients. In most cases, the situation can change dramatically for the matrices with unremovable singularity. Typically, the boundary value problems of indicated type may admit infinitely many weak solutions which can be divided into two classes: approximable and non-approximable solutions. A solution is called an approximable if it can be attained by weak solutions to the same problem with bounded approximated matrix of coefficients. However, there is another type of weak solutions, which cannot be approximated in such way. It means that the corresponding optimal control problem may also possess the same properties, i.e. it can admit the so-called pathological solutions when none of such solutions can be attained by optimal solutions to regularized optimal control problems with bounded matrices in coefficients of parabolic equation.

**The purpose** of this work is to give the example of an optimal control problem for parabolic equation with unbounded coefficients such that its unique solution has special singular properties. We show that because of these properties, a numerical simulation for a given class of optimal control problems is getting non-trivial.

**Results:** We prove that under special choice of the matrix of coefficients in an elliptic operator and the special construction of the right-hand side of the linear parabolic equation, a unique solution to the original optimal control problem has a singular character and it cannot be attainable through the solutions of the similar optimal control problems with bounded coefficients.

**Conclusions:** We give an example of optimal control problem for which its unique optimal pair has pathological properties, and show that because of this the approximation of such solution becomes non-trivial.

**Keywords:** parabolic equation, optimal control, variational solution, unbounded coefficient, existence result.

1. Fannjiang M.A., Papanicolaou G.C. Diffusion in turbulence. *Probab. Theory and Related Fields*, 1996, vol. 105, pp. 279–334.
2. Zhikov V.V. Diffusion in incompressible random flow. *Functional Analysis and Its Applications*. 1997, vol. 31, no. 3, pp. 156–166.
3. Zhikov V.V. Remarks on the uniqueness of a solution of the Dirichlet problem for second-order elliptic equations with lower-order terms. *Functional Analysis and Its Applications*, 2004, no. 3, pp. 173–183.
4. Kogut P.I. *On Approximation of an Optimal Boundary Control Problem for Linear Elliptic Equation with Unbounded Coefficients, Discrete and Continuous Dynamical Systems*. Series A, 34, no. 5, 2014, pp. 2105–2133.
5. Vazquez J.L., Zuazua E. The Hardy inequality and the asymptotic behavior of the heat equation with an inverse-square potential. *J. of Functional Analysis*. 2000, vol. 173, pp. 103–153.
6. Buttazzo G., Kogut P.I. Weak optimal controls in coefficients for linear elliptic problems. *Revista Matematica Complutense*, 2011, vol 24, pp. 83–94.
7. Kogut P.I., Leugering G. *Optimal Control Problems for Partial Differential Equations on Reticulated Domains: Approximation and Asymptotic Analysis*. Birkhäuser, Boston, 2011.
8. Jin T., Mazya V., van Schaftinger J. *Pathological solutions to elliptic problems in divergence form with continuous coefficients*. C. R. Math. Acad. Sci. Paris, 2009, vol. 347, no. 13–14, pp. 773–778.
9. Serrin J. *Pathological solutions of elliptic differential equations*. Ann. Scuola Norm. Sup. Pisa, 1964, vol. 3, no. 18, pp. 385–387.
11. Ivanenko V.I., Mel'nik V.S. *Variational Methods in Optimal Control Problems for Systems with Distributed Parameters*. Kyiv: Naukova Dumka, 1988 (in Russian).
12. Salsa S. *Partial Differential Equations in Action: From Modelling to Theory*. Milan, Springer-Verlag, 2008.
10. Adams R. *Sobolev spaces*. — Academic Press, New York, 1975.
13. Gorbonos S.O., Kogut P.I. Variational solutions of an optimal control problem with unbounded coefficient. *Visnyk DNU. Series: Mathematical Modelling*, 2013, vol. 5, no. 8, pp. 69–83 (in Ukrainian).

UDC: 681.5

## REGULARITY INVESTIGATION FOR MULTIDIMENSIONAL SYSTEM IDENTIFICATION PROBLEM BY THE FREQUENCY METHOD

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 are often ill-posed. Under certain conditions system identification problems are not well-posed in that the solution is highly sensitive to changes in the final data. This property is the fundamental characteristic of this class of problems, and holds irrespective of the solving method. It is studied in detail, for solving by frequency identification method.

**Purpose:** The purpose of research is to establish and investigate the conditions of ill-posed system identification problem arising and propose a regularization procedure for selected frequency identification method. Method includes the steps of structural and parametrical identification. The regularization procedure should provide a suitable choice of the model structure so that the problem of identification in certain conditions would be well-posed.

**Results:** For the method used, it has been shown how the errors in the initial data affect the accuracy of the models. On the basis of numerical experiments it was found, that the main factor affecting the accuracy of the solution is the matrix condition number of frequency equations. There has been established a conditionality limit above which makes the problem of identifying an ill-posed even for exact original data.

For frequency identification method the problem regularity testing procedure has been proposed. It is based on parameter variation estimation, and carried out through randomization. It doesn't requires any additional experiments. On the basis of the results obtained during the last time segment of the experiment, a variation area of estimating the eigenvalues of the model are constructed.

Depending on the condition number and the experiment duration, the domains of well-posed and ill-posed problems have been obtained. Getting into the zone of stability ensures that the problem of constructing a model in these conditions is well-posed. Getting into the transition zone requires verification test. In the zone of instability model is rejected.

**Conclusions:** The problem of identification of multidimensional systems can be well- or ill-posed, depending on what is used for baseline data. If the identification is performed by the frequency method, the main characteristics of the data are the duration of the experiment and error value. It has been shown that for a well-posed problem formulation it is necessary that model complexity be consistent with the error in the initial data. Error value of source frequency data determines the dimensionality of the models, which can be constructed correctly. Regularization parameter in this method is the dimension of the model, or, more correctly, the condition number of the corresponding system of frequency equations.

**Keywords:** System identification, ill-posed problem, regularization.

1. Kardashev A.A., Karniushin L.V. Determination of system parameters by the experimental (specified) frequency characteristics, *Automation and Remote Control*, 1958, vol. 19, no. 4, pp. 334–345 (in Russian).
2. Levy E.C. Complex curve fitting. *IRE Transactions on Automatic Control*, 1959, vol. 4, pp. 37–49.
3. Pintelon R., Guillaume P., Rolain Y., Shoukens J., Van hamme H. Parametric identification of transfer functions in the frequency domain – A survey. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1994, vol. AC-39, no. 11, pp. 2245–2260.
4. Alexandrov A.G. Method of frequency parameters. *Automation and Remote Control*, 1989, vol. 50, no. 12, pp. 3–15 (in Russian).
5. Alexandrov A.G., Orlov Y.F. *Finite-frequency identification of multidimensional objects. 2-nd Russian-Swedish Control Conference*. St. Petersburg, 1995, pp. 65–69 (in Russian).
6. Gubarev V.F., Melnychuk S.V. Identification of Multivariable Systems Using Steady-State Parameters. *Problems of Control and Informatics*, 2012, no. 5, pp. 26–42 (in Russian).

## INTERNAL AND EXTERNAL CONFLICTS IN KNOWLEDGE-BASED DISTRIBUTED CONTROL SYSTEMS

V.V. Pavlov, Y.M. Shepetukha

*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:** Main directions in the development of information and communication systems are both their very fast technological advance and essential increase in the variety as well as complexity of the tasks they deal with. But in spite of the tremendous growth of scientific publications in this area, a lot of important theoretical and practical issues have not been solved yet.

**Purpose:** Examination of conceptual issues as well as practical ways and means for most appropriate usage of modern information and communication technologies to support solving intelligent tasks in the conditions of conflict.

**Methods:** Artificial intelligence methods, man-machine theory, organismic conflict resolution theory, theory of deterministic chaos, methods of chaos synchronization and control.

**Results:** The principal goal of man-machine interaction is providing support for intelligent activity in the specific problem domain. This requires elaboration of efficient algorithms for formation, modification and application of both explicit and implicit fragments of knowledge. Advanced network technologies could be used for the creation of effective procedures of configuring and integrating of various knowledge elements distributed over time and space. System paradigm based on a net-centric concept allows an examination and effective modeling of both man-machine and internal applied processes. Such an approach also gives a possibility for display and examination of essential components for different types of internal as well as external conflicts within a wide range of situation's variables and parameters. It is essential that the development of distributed intelligent systems should take into consideration not only formalized procedures of examination and solving of typical conflict situations, but also experience and skills of effective actions in unexpected environmental conditions.

**Conclusion:** Development of intelligent systems requires, as a first step, elaboration of consistent methodology as well as feasible procedures for generation and structuring of knowledge related to both external and internal elements of conflict situation. The next step is an efficient integration of these elements into a single goal-directed system. The promising method to cope with this problem is the implementation of a net-centric paradigm in combination with the usage of various types of current situation's informational images. The proposed approach also allows an efficient modeling and examination of different kinds of applied processes.

**Keywords:** control, distributed system, conflict situation, applied process, knowledge formation, man-machine system, net-centric concept, integration.

1. Goebel R. Williams M.A. The expanding breadth of artificial intelligence research. *Artificial Intelligence*, 2010, vol. 174, no. 2, pp.133.



2. Pospelov G.S. *Artificial intelligence — the basis of a new information technology*. Moscow: Nauka, 1988. 280 p (in Russian).
3. Pavlov V.V. *Fundamentals of ergatic systems theory*. Kiev: Naukova dumka, 1975. 237 p. (in Russian).
4. Nonaka I., von Krogh G. Tacit knowledge and knowledge conversion: controversy and advancement in organizational knowledge creation theory. *Organizational Sciences*, 2009, vol. 20, no. 3, pp. 635–652.
5. Zatuliviter Yu.S. Issues of control paradigm globalization in a mathematically homogenous computer information field. *Problemy upravleniya*, 2005, no. 1, pp. 2–10 (in Russian).
6. Druzhinin V.V., Kontorov D.S. *Radar studies of conflict*. Moscow: Radio i svyaz, 1982. 124 p. (in Russian).
7. Pavlov V.V. *Conflicts in engineering systems*. Kiev: Vyshcha shkola, 1982. 184 p. (in Russian).
8. Swink M. Speier C. Presenting geographic information: effects of data aggregation, dispersion, and users' spatial orientation. *Decision Sciences*, 1999, vol. 30, no. 1, pp. 169–195.
9. Gauthier D.J. Controlling chaos. *American Journal of Physics*, 2003, vol. 71, no. 8, pp. 750–759.
10. Goodhue D.L., Thompson C.L. Task — technology fit and individual performance. *MIS Quarterly*, 1995, vol. 19, no. 2, pp. 213–236.

UDC: 004.75+004.932.2:616

## **PREPARING MEDICAL IMAGES FOR PROCESSING IN LARGE INFORMATION STORAGES**

**O.S. Kovalenko, A.O. Pezentsali, K.K. Tsarenko**

*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:** Improvement of working with medical images is one of the urgent tasks of practical healthcare. Diagnostic equipment provide image in digital form that require storing, processing and analysis in order to be used by medical personnel.

Development of information systems has caused occurrence of many data storage systems such as GRID and cloud, which are not only limited to storing digital medical images but also allow to process and analyze them. Special-purpose systems such as PACS (Picture Archiving and Communication System) are widely used as temporary digital images storage. PACS is a medical imaging technology which provides economical storage of and convenient access to images from multiple modalities. Electronic images and reports are transmitted digitally via PACS. The universal format for PACS image storage and transfer is DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine).

At the present time use of such systems in Ukrainian healthcare practice is extremely limited. This is due to the problem of switching from paper to electronic workflow that is not implemented healthcare facilities.

**The purpose** is in determination of main conditions, selection of methods and means of preparing (processing, storing, transmitting and analyzing) medical images for usage in big information storages on the example of GRID.

**Method:** In this work the method of hierarchical clustering is used.

**Result:** Preparing medical images for GRID-environment processing contains two processes. The first is about organization of software and technical system for

image sharing inside the healthcare facility and for image transmission to GRID. The second process lies in medical images pre-processing.

Three-level medical images processing system based on diagnostic and treatment system and temporary storage system in healthcare facility and GRID-system for long-term storage and analysis has been presented. Level functions were defined, scheme for image transmission and processing in the GRID has been suggested.

Method of scintigraphic kidney image analysis has been chosen and tested. Several patients' kidney scintigraphic images have been processed by the means of hierarchical clustering to classify patients by the value of pixel data of the selected fragments of images.

#### **Conclusions:**

Suggested three-level system allows regulating medical data of images for usage in diagnostic and treatment process and transmitting depersonalized medical images to GRID.

The chosen method of hierarchical clustering could be used as one of the stages of automated images analysis for grouping of series of patients images by diagnostically informative attributes.

By analyzing the mean pixel value of five patients' renal parenchyma and pelvis scintigraphic image segments authors could divide patients into three subgroups according to the functional state of the parenchyma and into three subgroups according to the functional state of the renal pelvis.

**Keywords:** medical images, GRID, storage and processing, DICOM.

1. Guidelines For Handling Image Metadata [Электронный ресурс]/ Metadata Working Group. 2010 – Adobe Systems Inc., Apple Inc., Canon Inc., Microsoft Corp., Nokia Corp. and Sony Corp. All rights reserved. Available at: [http://www.metadataworkinggroup.org/pdf/mwg\\_guidance.pdf](http://www.metadataworkinggroup.org/pdf/mwg_guidance.pdf) (accessed 21 February 2014).
2. EN ISO 12052:2011 Health informatics. Digital imaging and communication in medicine (DICOM) including workflow and data management Available at: <http://www.iso.org> (accessed 21 February 2014).
3. Zhuravlev E.E., Kornienko V.N., Oleynikov A.Ya., Shirobokova T.D. Model of an open grid system. *Journal of Radio Electronics*, 2012, no. 12, pp.1–19.

UDC: 681.513; 681.5.08

## **MODELLING OF HIDDEN FRAGMENTS POLAROGRAPHIC INVERSION CHRONOPOTENTIOTRAPHY OF TWO HEAVY METALS**

**A.E. Tatarinov**

*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:** Progressing process of environmental pollution by heavy metals harmful affects on human health. That is why the measurement of the mass concentration of heavy metals in the environment is an actual task. Currently one of the most common polarographic methods of measuring of the mass concentration of heavy metals is the method of inversion chronopotentiometry. To reduce the error introduced into the method that is associated with the error

determination of the mass concentration of heavy metals at their joint inversion is required to be able to model the hidden fragments intensity curves inversion of heavy metals. The article considers issues related to the modelling of hidden fragments of intensity curves inversion of heavy metals.

**The purpose** of the research is to obtain a model that can more accurately determine the concentration of each heavy metal in the sample.

**The task** is to develop a simulation algorithm, which will ensure equality of area under the original curve of inversion intensity sum of the areas under the modelled curves for the area joint inversion of the two metals.

**Methods:** To achieve our purpose we apply the numerical integration methods (for example, using the trapezoid rule) and linear extrapolation on hidden areas.

**Results:** The algorithm to approximate simulation of hidden fragments of inversion chronopotentiometric process of joint measurement of the mass concentration of the two heavy metals is obtained which allows realizing an approximate separation of their mass concentration.

**Conclusions:** Task of constructing an algorithm measuring the concentration of each of the two heavy metal with overlapping inversion ranges can be solved only if the following two assumptions, namely: the nature of the inversion processes of each heavy metal remains unchanged; displacement of the ends of each of the intensity curve inversion relative to the ordinate axis is equal. This allows to provide the approximate equality between the area under the original curve inversion intensity and the sum of area under the model curves for the plot joint inversion of the two metals.

Proposed approach to the construction of the algorithm allows practice the approximate separation of the mass concentrations of two heavy metals on the plot of their joint inversion and to evaluate the quantitative value of each metal as on the plot their joint inversion and in the sample as a whole.

Developed algorithm allows to estimate the proportion of concentration on the hidden plots inversion curve of each of the two heavy metals, thereby increasing the accuracy of measuring the concentration of each metal.

**Keywords:** polarography, polarographic chronopotentiogram, modelling, hidden fragments, heavy metal.

1. Tatarinov A.E., Surovtsev I.V., Babak O.V. The modelling of the Inversion chronopotentiometric process for measuring the mass concentration of separately taken heavy metal. *USiM*, 2012, no. 5, pp. 88–92 (in Russian).
2. Tatarinov A.E., Surovtsev I.V., Babak O.V. The modelling of the inversion chronopotentiometric process for simultaneous measuring the mass concentration of two heavy metals. *USiM*, 2013, no. 5, pp. 84–87 (in Russian).
3. Karnauhov O.I., Polumbrik O.M., Beznis A.T. Surovtsev I.V. The Inversion Chronopotentiometric Determination of Heavy Metals in the environment. *Nauk.-metodich. rozrobka*. Kiev: UGUPT, 1997. 88 p (in Russian).

## **SYNCHRONIZATION OF BIOLOGICAL TISSUES WITH COMPLETE MIXING ENVIRONMENT AS A JUSTIFICATION FOR THE SPATIALLY INHOMOGENEOUS ELECTROMAGNETIC FIELD DURING IRRADIATION OF TUMORS**

**N.A. Nikolov<sup>1,2</sup>, P.P. Loshitskiy<sup>1</sup>, A.G. Solayr<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Department of Physical and Biomedical Electronics, National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine*

<sup>2</sup>*Department of Telecommunication technologies, State University of Telecommunications, Kiev, Ukraine*

**Introduction:** Condition of homeostatic functions of biological fluids is provided by almost perfect mixing of dissolved components. Violation of tissue homeostasis or synchronization often leads to the appearance and progression of tumors. The missing of synchronization often leads to the appearance tumor cells which have different structures and functional activity. It makes malignant tumors resistant to chemo- and radiotherapy. One of the methods of regulation of local and regional blood flow and effective perfusion of biological tissues, including tumor is nonequilibrium reasonable electromagnetic hyperthermia. It does not increase the temperature of more than 1.5°C, and not have a direct cytotoxic effect.

Based on a percolation theory, the choice of the external physical factors spatial inhomogeneity is justified; this factor allows the improvement in perfusion of biological tissues. In the applied aspect, the results of the work theoretically justify the spatially inhomogeneous radiofrequency electromagnetic field at a moderate hyperthermia of the malignant tumours.

**The purpose of the paper** is to rationalise the choice of the most efficient spatial inhomogeneity of the electromagnetic irradiation of tumour during a combined therapy based on the change in the tissues' perfusion.

**Materials and Methods:** Lower limit of the spatial inhomogeneity of the external physical factor is estimated based on the evaluation of the characteristic radius of diffusion of biological cells metabolites, while for the upper one it is based on percolation theory and corresponding simulation. When simulating perfusion of tissues biological fluid depends on: the number of blood vessels, area of tissue, volumetric blood flow, penetration factor of fluid from the blood vessels into the tissue, spatial temperature gradient of tissue. The spatial distribution of the electromagnetic field which causes the heating was set sinusoidal function.

**Results:** The results of simulating showed that the more expressed spatial heterogeneity of external electromagnetic field during moderate hyperthermia of tissue the more increased perfusion. It is shown that the lower limit of the spatial inhomogeneity of the external physical factors is determined by the metabolites diffusion coefficient and their effective generation frequency, which geometrically corresponds to  $10^{-2}$ – $10^{-1}$  cm distances. The upper limit of the clusters' (patterns') geometric dimensions and their number of external fields on the basis of percolation theory and simulation is characterized by the total clusters area (volume) of 5–45 % useful space of irradiation, provided that there are more than three clusters.

**Conclusions:** For a fixed volume flow effective tumor perfusion increases with the number of blood vessels, as well as in enhancing the spatial inhomogeneity of the external electromagnetic fields. Increased blood flow or fluid velocity through the vessels uniquely characterizes the change in tissue perfusion.

The simulation shows that to increase the effective perfusion effect of the external physical factors "force" diffusion (random) component of the fluid in the tissues must be commensurate with the *forces* of directional movement.

**Keywords:** spatially inhomogeneous field, electromagnetic fields, synchronization, perfusion, percolation, a malignant tumor.

1. Romanovsky Y.M., Stepanova N.V., Chernavskii D.S. *Mathematical modeling in biophysics*. Moscow: Nauka, 1975. 344 p.
2. Cherezov A.E. *The general theory of cancer: tissue approach*. Moscow: MGU, 1997. 252 p. (in Russian).
3. Lazarus A.P. *Selected lectures on radionuclide diagnostics and radiotherapy*. Kiev: New Book, 2006. 200 p. (in Ukrainian).
4. Orel V.E., Shepotin I.B., Smolanka I.I., Kruchok I.A., Korovin S.I., Palivets A.Yu., Tsip N.P., Zotikov L.A., Romanov A.V., Dzyatkovskaya N.N., Litvinenko S.V., Smotrov I.V. *Radiofrequency hyperthermia malignant neoplasms, nanotechnology and dynamic chaos*. Ternopil: TSMU, 2012. 448 p. (in Russian).
5. V.E. Orel, T.S. Golovko, Smolanka I.I., Krachmaleva A.S., Nikolov N.A. Ultrasound imaging enhancement intratumoral blood flow in patients with breast cancer under the influence of local radiofrequency hyperthermia. *Radiodiagnosis, radiotherapy*, 2011, no. 3/4, pp. 43–47. (in Ukrainian).
6. Nikolov N.A., Donskova T.V. Mathematical modeling of the growth of malignant tumors under the synergistic effect of the spatially inhomogeneous external physical factors and chemotherapeutic drug. *Electronics and Communications. Special Issue "Electronics and Nanotechnology"*, 2010, vol. 55, no. 2, pp. 142–146 (in Russian).
7. Orel V.E., Nikolov N.A., Romanov A.V., Dzyatkovskaya N.N., Melnik Yu.I. Influence of the inhomogeneity of the electromagnetic field to enhance the antitumor activity of doxorubicin. *Electronics and Communications*, 2008, no. 3–4, pp. 173–177 (in Russian).
8. Orel V.E., Dzyatkovskaya I.I., Nikolov M.O., Romanov A.V., Dzyatkovskaya N.N., Kulik G.I., Todor I.M., Hranovskaya N.N., Skachkova O.I. Influence of spatially uneven electromagnetic field on anti-tumor activity of Cisplatin at its action on resistant to it substrain of lung carcinoma Lewis. *Ukrainian Journal of Radiology*, 2009, vol. 17, no. 1, pp.72–77. (in Ukrainian).
9. Malenko A.G., Chuich G.A. *Intercellular contacts and tissue reaction*. Moscow: Medicine, 1979. 136 p. (in Russian).
10. Vasiliev Yu.M. Cell as an architectural marvel. Part 3. Single cell, but divisible. *Soros Educational Journal*, 1999, no. 8, pp. 18–23 (in Russian).
11. Murray J.D. *Lecture on nonlinear-differential-equation models in biology*. Clarendon Press. Oxford, 1977. 398 p.
12. Murray R., Graner D., Mayes P., Rodwell V. *Harper's biochemistry*. 21 ed. Appleton & Lange, Norwalk, Connecticut/san Mateo, California, 1988. 415 p.
13. Growth Factors. *Group of companies "BioHimMak"*. Available at: [http://laboratory.rusmedserv.com/files/39\\_Factory\\_Rosta.pdf](http://laboratory.rusmedserv.com/files/39_Factory_Rosta.pdf) (accessed 16 January 2014).
14. Tarasevich Yu.Yu. *Percolation theory, applications, algorithms: Textbook*. Moscow: Editorial URSS, 2002. 112 p.
15. Kesten H. *Percolation theory for mathematicians*. Boston-Basel-Stuttgart: Birkhauser, 1982. 392 p.
16. Antonov V.A., Matusova A.P., eds. *Biorhythmic and self-organization processes in the cardiovascular system. Theoretical study and practical value*. Nizhny Novgorod: Institute of Applied Physics, 1992. 220 p.
17. Feder J. *Fractals*. New York: Plenum Press, 1988. 254 p.

18. Nikolov N.A. Experimental changes in the kinetics of <sup>99m</sup>Tc-MIBI in tumor Walker-256 under the influence of spatially inhomogeneous electromagnetic field. *Ukrainian Journal of Radiology*, 2011, vol. 19, no. 3, pp. 312–315 (in Ukrainian).

UDC: 613.71/73-615.83

## MONITORING AND CORRECTION OF STUDENTS' FUNCTIONAL STATE BY THE INFORMATION TECHNOLOGY TOOLS

L.M. Kozak<sup>1</sup>, M.V. Lukashenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *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*

<sup>2</sup> *Vinnitsya Medical College Named after Academician D.K. Zabolotny*

**Introduction:** The functioning of the educational system is aimed at the professional development of young people, the formation of highly qualified specialists in conjunction with the preservation of their health. For a full and adequate assessment, monitoring and timely correction of students' functional state (FS) it is necessary to use new information technologies.

**The purpose** is the analysis of information technology developed for monitoring the functional state of students to form differentiated programs of psychological support in the learning process.

**Results:** The basis of information technology (IT) is the formed hierarchical information model of a students' functional state including intellectual, emotional, and personality-motivational components. Normalized assessments of all levels of the hierarchical information model were generated. The study of the developed information model with two groups of students with different learning load was conducted. Testing was conducted four times a year, at the beginning and the end of each two terms. As changes in the individual functional state of students were present in all components of functional state in varying degrees the problems of the additional psychological support were arisen. The task of automating the formation of differentiated psychological support groups is solved by using the developed algorithm, which allows us to analyze the students' functional state based on a hierarchical information model.

Set of differentiated programs for psychological support was developed, the elements of which were trainings aimed at the intellectual, emotional, motivational aspects of psychical activities. Using this psychological training set allowed to form effecting by a program for each particular group of additional psychological support, taking into account the need to correct the state of certain functions of the intellectual, emotional or personality-motivational components.

Using this set allowed us to form effecting by a program for each particular group of additional psychological support, taking into account the need to correct the state of certain functions of the intellectual, emotional or personality-motivational components.

Based on the developed models, a set of criteria classification, algorithms for determining the normalized estimates and forming groups of psychological support the information technology for monitoring and correction of students' functional state in the learning process was developed. Information technology includes three major stages: monitoring the functional state, the classification of this state and on

the basis of obtained estimates formation of differentiated programs of psychological support and its correcting.

**Conclusions:** Monitoring functional status using the developed information technology can detect the need for additional psychological support. The results show a mosaic combination of psychological functions states that require correction forming the basis of the formation of differentiated programs of the psychologist' additional work. Evaluation of the results of the students' functional state correction indicates an improvement in functional reserves for the improve of the efficiency of the educational process.

**Keywords:** information technology, student's functional state, monitoring and correction of students' functional state, differentiated programs of psychological support.

1. Ilyin E.P. *Emotions and feelings*. SPb.: Peter, 2011. 783 p. (in Russian).
2. Bancroft J. Intervention in crisis. *Introduction to Psychotherapy*. Amsterdam — Kiev: Sphere, 1997. Pp.116–135 (in Russian).
3. Burlachuk L.F., Morozov S.M. Dictionary of psychological diagnostics. Kiev: Science. Dumka, 1989. 200 p. (in Russian).
4. Karelina A.A. ed. Psychological tests. Vol. 1. Moscow: Publishing Center for Humanities VLADOS 2003. 312 p. (in Russian).
5. Halberg F., Johnson E.A., Nelson W., Runge W., Sothem R. Autorhythmometry procedures for psychologic self — measurements and their analysis. *Physiol. Teacher*, 1972, no. 1, pp. 1–11.
6. Kozak L.M., Elizarov V.A. Automated system for determining the characteristics of the intellectual and emotional components of the mental health status of the person. *Zh. honey. tehniki that tehnologii*, 1995, vol. 3, pp. 59–66 (in Russian).
7. Horney K. *Anxiety*. Vol. 2. Moscow: Smysl, 1997. Pp. 174–180 (in Russian).
8. Leary T., Coffey I. Interpersonal diagnosis. *Teories of Personality Investigation*. New York, 1969, pp. 73–96.
9. Sobchik L.N. *Diagnosis of individual typological characteristics and interpersonal relationships*. A practical guide. St. Petersburg.: Speech, 2002. 96 p. (in Russian).
10. Antomonov M. Formation and use of the integral characteristics of functions obtained in medical and environmental research. *Journal Ukrainsky medichnoi tehniki i tehnologii*, 1998, no. 4, pp. 122–127 (in Russian).
11. Antomonov M. *Mathematical processing and analysis of biomedical danyh*. Kiev: Maliy Druk, 2006. 558 p. (in Russian).
12. *Bioekomeditsina. Single information space*. Kiev: Nauk. dumka 2001. 319 p. (in Russian).
13. Cukanov B.I. *Time in the human psyche*. Odessa: Astroprint, 2000. 220 p. (in Russian).

## АВТОРЫ НОМЕРА

---

*Горбонос Светлана Алексеевна,*

аспирант кафедры дифференциальных уравнений механико-математического факультета Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара, пр. Гагарина, 72, г. Днепропетровск, 49010, e-mail: gorbonos.so@gmail.com

*Коваленко Александр Сергеевич,*

доктор медицинских наук, профессор, заведующий отделом медицинских информационных систем Международного научно-учебного центра информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины, пр. Академика Глушкова, 40, г. Киев, 03680 ГСП, e-mail: alexkovalenko@yandex.ru

*Козак Людмила Михайловна,*

доктор биологических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник отдела медицинских информационных систем Международного научно-учебного центра информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины, пр. Академика Глушкова, 40, г. Киев, 03680 ГСП, e-mail: lmkozak@mail.ru

*Когут Петр Ильич,*

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры дифференциальных уравнений механико-математического факультета Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара, пр. Гагарина, 72, г. Днепропетровск, 49010, e-mail: p.kogut@i.ua

*Лошицкий Павел Павлович,*

доктор технических наук, профессор кафедры физической и биомедицинской электроники Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт», ул. Политехническая, 16, корпус 12, г. Киев, 03056, e-mail: pepel@phbme.kpi.ua

*Лукашенко Марина Владимировна,*

психолог Винницкого медицинского колледжа им. Д.К. Заболотного, ул. Пирогова, 57, г. Винница, 21037, e-mail: marina.look@gmail.com

*Мельничук Сергей Викторович,*

аспирант отдела управления динамическими системами Института космических исследований НАН Украины и ГКА Украины, пр. Академика Глушкова, 40, корпус 4/1, г. Киев, 03680, e-mail: sergvik@ukr.net

*Николов Николай Александрович,*

кандидат технических наук, доцент кафедры физической и биомедицинской электроники Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт», ул. Политехническая, 16, корпус 12, г. Киев, 03056; доцент кафедры телекоммуникационных технологий Государственного университета телекоммуникаций, ул. Соломенская, 7, г. Киев, 03680, e-mail: nikolka\_@ukr.net



*Павлов Вадим Владимирович,*

доктор технических наук, профессор,  
заведующий отделом  
интеллектуального управления  
Международного научно-учебного  
центра информационных технологий  
и систем НАН Украины и МОН  
Украины, пр. Академика Глушкова,  
40, г. Киев, 03680 ГСП, e-mail:  
dep185@irtc.org.ua

*Пезенцали Анна Александровна,*

кандидат технических наук,  
научный сотрудник отдела  
медицинских информационных  
систем Международного научно-  
учебного центра информационных  
технологий и систем НАН Украины  
и МОН Украины, пр. Академика  
Глушкова, 40, г. Киев, 03680 ГСП,  
e-mail: annp26@gmail.com

*Соляр Алексей Григорьевич,*

аспирант кафедры физической и  
биомедицинской электроники  
Национального технического  
университета Украины «Киевский  
политехнический институт», ул.  
Политехническая, 16, корпус 12,  
г. Киев, 03056, e-mail:  
mail.lewa@gmail.com

*Татаринев Алексей Эдуардович,*

младший научный сотрудник отдела  
информационных технологий  
обнаружения и моделирования  
закономерностей Международного  
научно-учебного центра информа-  
ционных технологий и систем НАН  
Украины и МОН Украины,  
пр. Академика Глушкова, 40, г. Киев,  
03680 ГСП, e-mail:  
dep175@irtc.org.ua

*Царенко Екатерина*

*Константиновна,*

инженер I категории отдела  
медицинских информационных  
систем Международного научно-  
учебного центра информационных  
технологий и систем НАН Украины  
и МОН Украины, пр. Академика  
Глушкова, 40, г. Киев, 03680 ГСП,  
e-mail: tsarenko.kateryna@gmail.com

*Шенетуха Юрий Михайлович,*

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