НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-УЧЕБНЫЙ ЦЕНТР
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И СИСТЕМ НАН УКРАИНЫ И МОН УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ КИБЕРНЕТИКИ ИМ. В.М. ГЛУШКОВА НАН УКРАИНЫ

Кибернетика и вычислительная техника

2 (192)/2018

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ ▪ ОСНОВАН В 1965 г. ▪ ВЫХОДИТ 4 РАЗА В ГОД ▪ КИЕВ

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика и информационные технологии

L.S. FAINZILBERG, N.A. MATUSHEVYCH Comparative Evaluation of Convergence's Speed of Learning Algorithms for Linear Classifiers by Statistical Experiments Method …… 5

В.І. ГРИЦЕНКО, А.Я. ГЛАДУН, Ю.В. РОГУШИНА Моделі та методи використання семантичних Wiki-ресурсів як джерела знань для поповнення формальних онтологій предметних областей …… 23

Интеллектуальное управление и системы

L.S. ZHITECKII, K.Yu. SOLOVCHUK Adaptive Stabilization of Some Multivariable Systems with Nonsquare Gain Matrices of Full Rank …… 44

Медицинская и биологическая кибернетика

A.B. BUZYNOVSKY, O.S. KOVALENKO, N.R. BAYAZITOV, L.S. GODLEVSKY The Effectiveness of Surgeon Decision on Pain Syndrome of Pelvic Origin Treatment in Women Estimated with the Model of Decision Tree …… 61

L.M. RYSOVANA, O.V. VYSOTSKA Information System of Detection of Emotional and Cognitive Disorders in Patients with Discirculatory Encephalopathy …. 72

С.М. ЗЛЕПКО, Т.А. ЧЕРНИШОВА, О.Е. МАЄВСЬКИЙ, В.Є. КРИВОНОСОВ, О.Ю. АЗАРХОВ Інформаційна технологія визначення циркулюючих пухлинних клітин в крові людини …… 84

Вниманию авторов …… 99

© Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины, 2018
© Институт кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины, 2018

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE
INTERNATIONAL RESEARCH AND TRAINING CENTER FOR INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS OF THE NAS OF UKRAINE AND OF MES OF UKRAINE
V.M. GLUSHKOV INSTITUTE OF CYBERNETICS OF THE NAS OF UKRAINE

Cybernetics and Computer Engineering

2 (192)/2018

SCIENTIFIC JOURNAL ▪ FOUNDED IN 1965 ▪ PUBLISHED 4 TIMES PER YEAR ▪ KYIV

CONTENTS

Informatics and Information Technologies

L.S. FAINZILBERG, N.A. MATUSHEVYCH Comparative Evaluation of Convergence's Speed of Learning Algorithms for Linear Classifiers by Statistical Experiments Method 5

V.I. GRITSENKO, A.Ya. GLADUN, Yu.V. ROGUSHINA Models and Methods of the Semantic Wiki Resources Use as Knowledge Sources for Renewal of Formal Domen Ontologies 23

Intelligent Control and Systems

L.S. ZHITECKII, K.Yu. SOLOVCHUK Adaptive Stabilization of Some Multivariable Systems with Nonsquare Gain Matrices of Full Rank 44

Medical and Biological Cybernetics

A.B. BUZYNOVSKY, O.S. KOVALENKO, N.R. BAYAZITOV, L.S. GODLEVSKY The Effectiveness of Surgeon Decision on Pain Syndrome of Pelvic Origin Treatment in Women Estimated with the Model of Decision Tree 61

L.M. RYSOVANA, O.V. VYSOTSKA Information System of Detection of Emotional and Cognitive Disorders in Patients with Discirculatory Encephalopathy 72

S.M. ZLEPKO, T.A. CHERNYSHOVA, O.E. MAEVSKY, V.Ye. KRIVONOSOV, O.Yu. AZARKHOV Information Technology of Determining Circular Tumor Cells in Human Blood 84

To Attention of Authors 99

© International Research and Training Center for Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine and MES of Ukraine, 2018
© Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine, 2018

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВО-НАВЧАЛЬНИЙ ЦЕНТР
ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА СИСТЕМ НАН УКРАЇНИ І МОН УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ КІБЕРНЕТИКИ ІМ. В.М. ГЛУШКОВА НАН УКРАЇНИ

Кібернетика та обчислювальна техніка

2 (192)/2018

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ ▪ ЗАСНОВАНИЙ У 1965 р. ▪ ВИХОДИТЬ 4 РАЗИ НА РІК ▪ КИЇВ

ЗМІСТ

Інформатика та інформаційні технології

Л.С. ФАЙНЗІЛЬБЕРГ, Н.А. МАТУШЕВИЧ Порівняльна оцінка швидкості збіжності алгоритмів навчання лінійних класифікаторів за методом статистичного експерименту 5

В.І. ГРИЦЕНКО, А.Я. ГЛАДУН, Ю.В. РОГУШИНА Моделі та методи використання семантичних Wiki-ресурсів як джерела знань для поповнення формальних онтологій предметних областей 23

Інтелектуальне керування та системи

Л.С. ЖИТЕЦЬКИЙ, К.Ю. СОЛОВЧУК Адаптивна стабілізація деяких багатовимірних систем з прямокутними матрицями коефіцієнтів підсилення повного рангу 44

Медична та біологічна кібернетика

А.Б. БУЗИНОВСЬКИЙ, О.С. КОВАЛЕНКО, М.Р. БАЯЗІТОВ, Л.С. ГОДЛЕВСЬКИЙ Оцінювання ефективності прийняття рішень хірургом у разі больового синдрому мискового походження за допомоги моделі дерева рішень 61

Л.М. РИСОВАНА, О.В. ВИСОЦЬКА Інформаційна система виявлення емоційних і когнітивних порушень у хворих на дисциркуляторну енцефалопатію 72

С.М. ЗЛЕПКО, Т.А. ЧЕРНИШОВА, О.Е. МАЄВСЬКИЙ, В.Є. КРИВОНОСОВ, О.Ю. АЗАРХОВ Інформаційна технологія визначення циркулюючих пухлинних клітин в крові людини 84

До уваги авторів 99

© Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем НАН України та МОН України, 2018
© Інститут кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України, 2018

Информатика и информационные технологии

DOI: https://doi.org/10.15407/kvt192.02.005

UDC 004.021

L.S. FAINZILBERG[1], D.Sc. (Engineering), Professor,
Chief Researcher of the Department of Intelligent Automatic Systems
e-mail: fainzilberg@gmail.com
N.A. MATUSHEVYCH[2], Master student
Faculty of Biomedical Engineering
e-mail: natalie.matushevych@gmail.com
[1] International Research and Training Center for Information Technologies
and Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine
and Ministry of Education and Science of Ukraine,
Acad. Glushkova av., 40, Kiev, 03187, Ukraine
[2] The National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Peremohy av. , 37, Kiev, 03056, Ukraine

COMPARATIVE EVALUATION OF CONVERGENCE'S SPEED OF LEARNING ALGORITHMS FOR LINEAR CLASSIFIERS BY STATISTICAL EXPERIMENTS METHOD

Introduction. *One of the main tasks of artificial intelligence is pattern recognition, which is often reduced to determining the discriminant function parameters in the multidimensional feature space. When recognizable objects can be completely separated by a linear discriminant function, the task is reduced to the linear classifier learning. There are many algorithms for linear classifiers learning, two of which are the Rosenblatt learning algorithm and the Kozinets algorithm.*

The purpose of the article *is to investigate the properties of the Rosenblatt and Kozinets learning algorithms on the basis of statistical experiment by the Monte Carlo method.*

Methods. *Two algorithms for linear classifiers learning have been studied: Rosenblatt and Kozinets. A number of researches have been performed to compare the convergence rate of algorithms for a different number of points and for their different location. Variation of the iterations number of algorithms spent on samples of different sizes was analyzed.*

Results. *Statistical experiments have shown that for a small sample size in approximately 20% of cases the convergence rates of the Rosenblatt and Kozinets algorithms are the same, but with the increase of observations number, the Kozinets learning algorithm proved to be the absolute leader. Also, the convergence rate of the Kozinets learning algorithm is less sensitive to the location of points in the learning sample.*

© L.S. FAINZILBERG, N.A. MATUSHEVYCH, 2018

Conclusions. *The higher convergence rate of the Kozinets algorithm compared to the Rosenblatt algorithm, confirmed by a series of statistical experiments, allows formulating a promising research line on the evolution of neural networks where the Kozinets algorithm will be used to adjust the basic elements — perceptrons.*

Keywords: *Linear classifier, Rosenblatt algorithm, Kozinets algorithm.*

INTRODUCTION

The task of learning objects recognition of different physical nature (Machine Learning) — one of the main tasks of artificial intelligence [1–6]. Quite often it is regarded as a problem of determining the parameters of the discriminant function (functions) in the multidimensional feature space [7].

Linear discriminant functions deserve special attention, which, according to [8], any Bayesian recognition strategy comes down to in probability space. It should be borne in mind, that linear discriminant function assumes that an increase in the values of one feature can be compensated by a decrease in the value of another feature, which is not always true [9]. Nevertheless, linear classifiers are widely used in solving many practical problems [9, 10].

In those cases when Nature goes to meet the designer of the application system and in the original or transformed (straightening) feature space the recognizable objects can be completely separated by a linear discriminant function, the problem is reduced to the learning of a linear classifier on a finite number of observations [8]. There are variety of linear classifiers learning algorithms, two of which — the perceptron learning algorithm proposed by Frank Rosenblatt [11] and the algorithm of B.N. Kozinets [12].

In a well-known theorem of Novikoff it is proved that the perceptron algorithm converges for a finite number of iterations under the condition of the objects linear separability of the training sample [13]. This theorem is much more clearly and convincingly proved in [14]. It is this proof that is regarded as the canonical proof of perceptron convergence. An analogous theorem on finite convergence is proved for the Kozinets algorithm [12].

In the same time formal conditions that give an estimate of the maximum number of iterations of these algorithms are rather rough [8]. Therefore, these estimates do not allow an unambiguous answer to an important question: which of the algorithms and when provides the fastest rate of convergence in the learning process for the final sample of observations. A range of other properties of these algorithms, which are important in solving specific practical problems are also unknown.

The purpose of the article is to investigate the properties of the Rosenblatt and Kozinets learning algorithms on the basis of statistical experiment by the Monte Carlo method.

LEARNING ALGORITHMS FOR LINEAR CLASSIFIERS

Before describing the proposed technology for performing a statistical experiment, let's consider basic principles of the Rosenblatt and Kozinets learning algorithms on the example of recognizing two classes V_1 and V_2 [11–13].

Let the observation of the sample with the known belonging to classes is set in N-dimensional feature space:

$$X = \{(x_1^{(N)}, c_1), (x_2^{(N)}, c_2), ..., (x_n^{(N)}, c_n)\}, \quad (1)$$

where n — number of elements in the sample, $x_j^{(N)} \triangleq (x_1, ...x_N)$ — points (N-dimensional vectors), and c_j — an indicator variable such that:

$$c_j = \begin{cases} +1, & \text{if } x_j^{(N)} \in V_1, \\ -1, & \text{if } x_j^{(N)} \in V_2. \end{cases} \qquad j = 1,...n. \quad (2)$$

It is assumed that the observations of the classes V_1 and V_2 can be separated by a linear discriminant function

$$D(x) = \langle w, x \rangle \triangleq \sum_{i=0}^{N} w_i x_i, \quad (3)$$

in which, for convenience, the notation $\langle w, x \rangle$ denotes the scalar product $(N+1)$-dimensional vectors $w = (w_0, w_1, ..., w_N)$ - parameters (weights) of the discriminant function and extended vectors $x = (1, x_1, ...x_N)$.

The problem is to determine the parameters vector $w = (w_0, w_1, ..., w_N)$ of the discriminant function (3) for the final training sample (1) with known values of the indicator variable (2), which will allow us to separate the observations of the sample according to the scheme:

$$\text{decision in favor of } V_1, \text{ if } \langle w, x \rangle > 0, \quad (4)$$

$$\text{decision in favor of } V_2, \text{ if } \langle w, x \rangle < 0. \quad (5)$$

The idea of both algorithms is to implement iterative procedures which allow to adjust some initial value of the vector $w = (w_0, w_1, ..., w_N)$, based on sequential viewing of points in the training sample (1). As a result of such correction after a certain number of iterations, the discriminant function will ensure an error-free separation of the sample elements according to the scheme (4), (5).

The difference between learning algorithms is in the correction mechanism.

The F. Rosenblatt algorithm [11] is reduced to the implementation of such steps (Fig. 1):

1. Arbitrarily set the initial values of the vector $w^{(0)}$. For example, for the two-dimensional case ($N = 2$) can set $w^{(0)} = (0, 0, 1)$.

2. The observations $x_\alpha^{(t)} = x^{(N)}$, $\alpha = 1,...,n$, from the training sample (1), is selected sequentially and in accordance with (3) the values of the discriminant function $D(w^{(t-1)}, x_\alpha^{(t)},)$ are defined at the current value of the vector $w^{(t-1)}$, $t = 1,2,...$.

3. An error is calculated :

$$\delta_{\alpha}^{(t)} = D\left(w^{(t-1)}, x_{\alpha}^{(t)}\right) - c(x_{\alpha}^{(t)}), \tag{6}$$

which is the difference between the value of the discriminant function (3) and the known value of the indicator variable (2), which corresponds to the selected observation $x_{\alpha}^{(t)}$.

4. If the current observation $x_{\alpha}^{(t)}$ is not properly classified (fig. 1, b) the weights vector is modified as follows:

$$w^{(t)} = w^{(t-1)} + \gamma\left(\delta_{\alpha}^{(t)}\right)^{T} x_{\alpha}^{(t)}, \tag{7}$$

where $0 < \gamma < 1$ — preset correction rate (fig. 1, b).

5. Steps 2–4 are repeated until all sampling points (1) have been classified correctly (fig. 1, c).

A theorem was proved in [13], according to which for a finite linearly separable sample the iterations number of the Rosenblatt algorithm is limited:

$$t^{0} \le \frac{Q^{2}}{\varepsilon^{2}}, \tag{8}$$

where $Q = \max\limits_{i \in [1,n]} \left| x_i^{(N)} \right|$, $\varepsilon = \min\limits_{x \in \mathrm{Co}(X)} \left| x^{(N)} \right| > 0$, here $\mathrm{Co}(X)$ — convex hull of the set X.

In the work [12] B.N. Kozinets proposed different iterative learning algorithm, which was later called the Kozinets algorithm.

The main idea of the algorithm is that at each step of the iteration $t = 1,2,...$ is searched for such an observation $x_{\alpha}^{(t)} = x^{(N)}$, $\alpha = 1,...,n$, from the training sample (1), which is incorrectly classified at the current value of the parameter vector $w^{(t-1)}$ of the discriminant separating function. If there are no such vectors for all points of the training sample, then the algorithm completes its work.

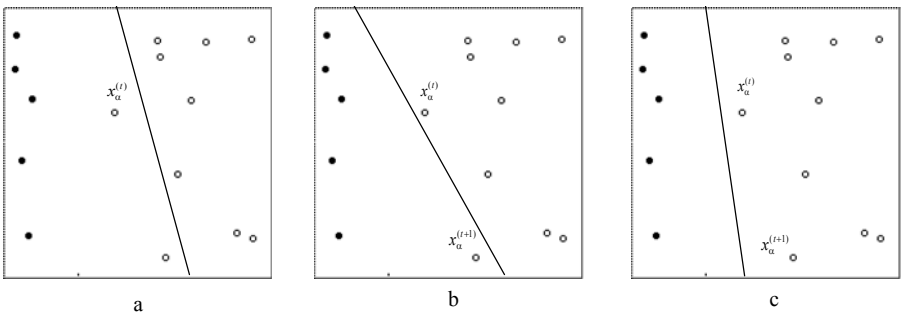

Fig. 1. Graphic interpretation of the Rosenblatt learning algorithm

If a vector $x_\alpha^{(t)}$ is found that is incorrectly classified, then the parameter vector is corrected as follows [8]:

$$w^{(t)} = (1-\gamma^{(t)}) \cdot w^{(t-1)} + \gamma^{(t)} \cdot x_\alpha^{(t)}, \tag{9}$$

where

$$\gamma = \operatorname{argmin} \left| (1-\gamma^{(t)}) \cdot w^{(t-1)} + \gamma^{(t)} \cdot x_\alpha^{(t)} \right|. \tag{10}$$

Let's give a graphic interpretation of the Kozinets algorithm for the case $N = 2$, when using a straight line it is necessary to divide two sets of points on the plane. The algorithm is reduced to performing such steps (Fig. 2, 3):

1. Two points of the training sample, belonging to different classes, are randomly selected, and a straight line is drawn between them AB (Fig. 2, a).

2. The parameters of the middle perpendicular W_0 to the segment AB determine the initial approximation of the parameters vector $w^{(0)}$ of the unknown discriminant function.

3. An arbitrary point M is chosen and the sign of the indicator variable (2) determines its belonging to one of the classes. The point M connects with a point B of the same class by line, and the perpendicular AP is gone down to the indicated line from the point A of the opposite class (Fig. 2, b).

4, a. If the base of the perpendicular AP extends beyond the straight line BM (Fig. 2, b), then the point M determines the new position of the straight line AB (Fig. 1, c), with the help of which the parameters $w^{(1)}$ of the corrected discriminant function W_1 are found.

4, b. If the base of the perpendicular AP lies within the segment BM (Fig. 3, b), then the new position of the straight line AB (and hence the parameters $w^{(1)}$ of the corrected discriminant function W_1) is determined by point P.

Steps 1–4 are repeated until all points of the training sample (1) are properly classified.

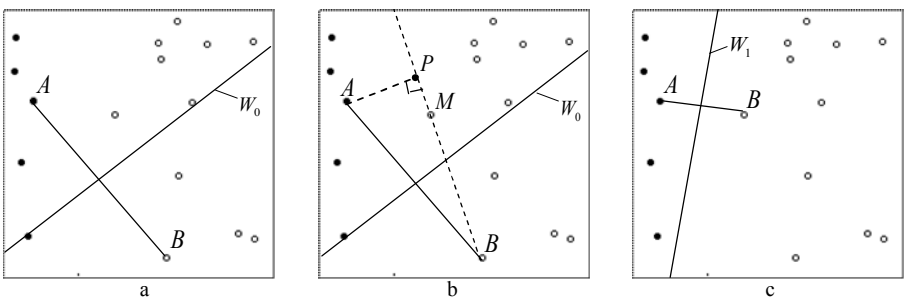

Fig. 2. Graphical interpretation of the Kozinets algorithm on the plane (1st case)

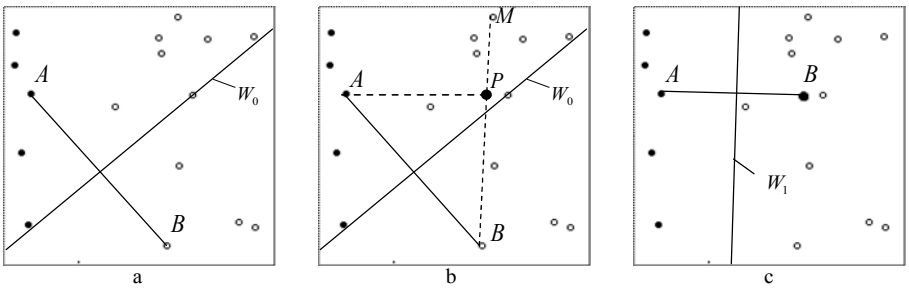

Fig. 3. Graphical interpretation of the Kozinets algorithm on the plane (2nd case)

In accordance with the proved theorem [12, 14], the Kozinets algorithm converges in a finite number of iterations

$$t_0 \le \frac{Q^2}{\varepsilon^2} \ln \frac{Q^2}{\varepsilon^2}. \tag{11}$$

At first glance, comparing the estimates (8) and (11) it may seem that the Rosenblatt algorithm always converges with a smaller number of iterations. However, as noted in [8], the estimates (8) and (11) are rather rough, and hence the conclusion about the superiority of the Rosenblatt algorithm on the basis of these estimates is not valid. Therefore, it is proposed to compare the rate of algorithms convergence based on the statistical experiment.

TECHNOLOGY OF STATISTICAL EXPERIMENT IMPLEMENTATION

Following the statistical experiment methodology [15–17], a software tool system was developed. It makes it possible to carry out experiments to estimate the rate of convergence of the Rosenblatt and Kozinets algorithms. Such experiments were performed on the random data samples generated by the Monte Carlo method.

When the program starts (Fig. 4), the user is able to generate data for the experiment (***generate data***) in three different ways:

- automatically (***automatically with preferences***);
- manually by specifying the sampling points corresponding to the different classes on the plane (***manually on the canvas***);
- by loading from a file (***download from file***).

With a single start of the program (***launching unit***), sets of points of two classes are generated, which can obviously be separated by a straight line, and the Rosenblatt and Kozinets learning algorithms are started parallel (Fig. 5).

At the end of the experiment, the dividing lines and the histogram of the iterations numbers spent by each algorithm are displayed (***drawing the unit iteration chart***).

For multiple experiments (***launching multiple***), a number of additional functions are available, in particular, a histogram display of the percentage of the iterations number spent by each algorithm in learning (***drawing chart with percent of the multiple iterations***). This makes it possible to evaluate and compare the probabilities of successful learning completion and thereby determine the leader with specific system settings.

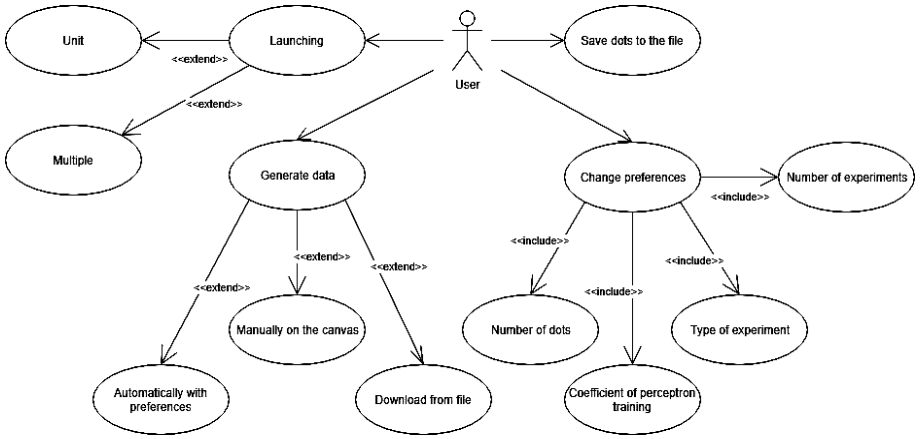

Fig. 4. Use Case diagram in UML notations

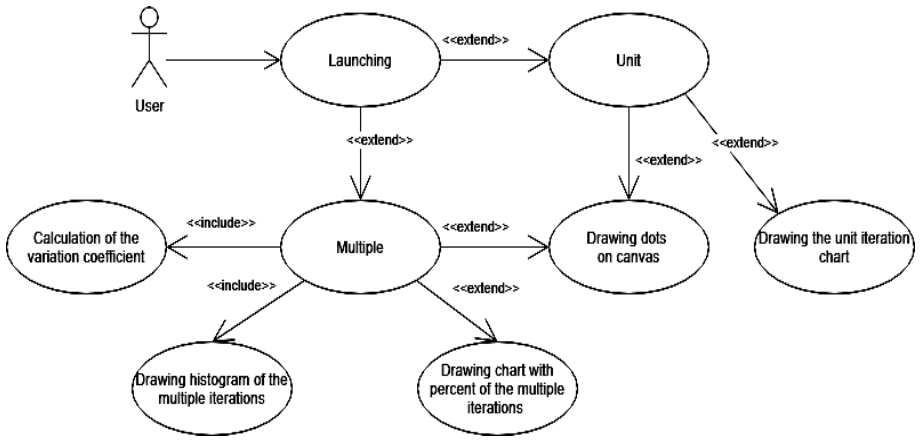

Fig. 5. Use Case diagram in UML notations

It is also possible to calculate the coefficient of variation of the iterations number spent by algorithms in multiple experiments (***calculation of the variation coefficient***).

For illustration on Fig. 6 it is presented a sequence diagram, which explaining the details of the relationships between the main units of the program: the interface (***desktop application***), the point generation unit (***points generation***), the drawing unit (***drawing algorithm***) and the algorithms of Rosenblatt (***Perceptron algorithm***) and Kozinets (***Kozinets algorithm***).

Each time when the procedures that implement the algorithms of Rosenblatt (***Perceptron algorithm***) and Kozinets (***Kozinets algorithm***) run, the iteration numbers U_1 and U_2 are calculated before the work stoppage the Rosenblatt and Kozinets algorithms, respectively. The stopping moments determine the condition

$$\left\langle w, x_j \right\rangle \cdot c_j > 0\,, \qquad j = 1,...n\,, \tag{12}$$

which in accordance with (2), (4), (5) indicates that at the current value of the parameter vector w all points of the training sample corresponding to the classes V_1 and V_2, are completely separated by a linear discriminant function.

Based on the comparison of numbers U_1 and U_2, the leader in the current experiment is determined:

The leader is the Rosenblatt algorithm, if $U_1 < U_2$,
The leader is the Kozinets algorithm, if $U_2 < U_1$.

Results of comparison (***result of comparison***) are visualized by the corresponding bar chart (***charts drawing***).

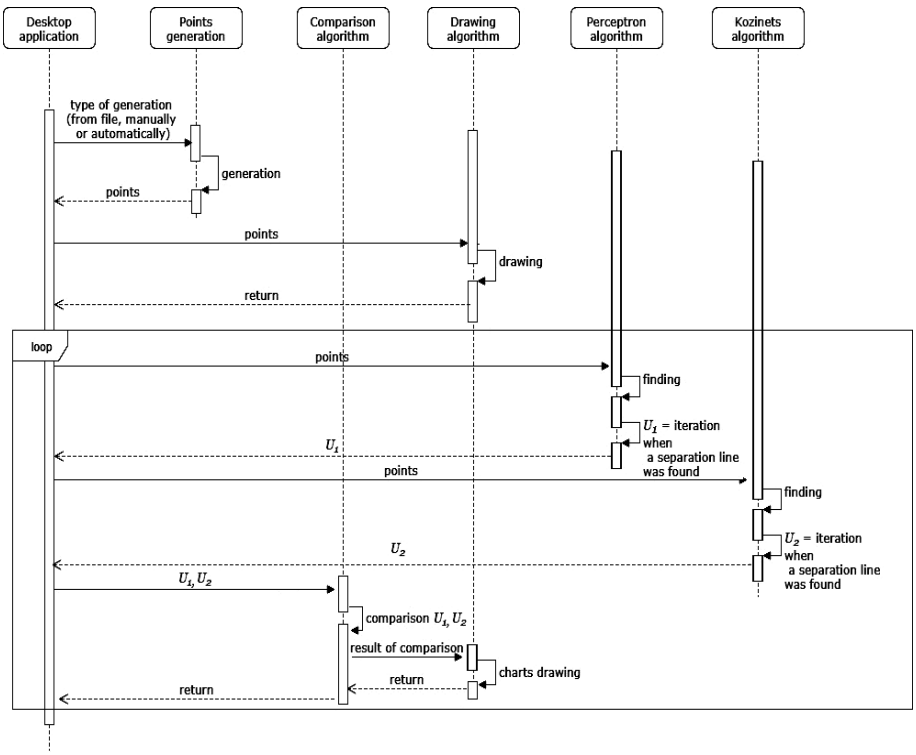

Fig. 6. Sequence diagram

RESULTS OF STATISTICAL EXPERIMENTS

Let's consider some results obtained during the experimental study of the properties of the Rosenblatt and Kozinets learning algorithms on samples of random observations linearly separable on the plane.

The first series of experiments was aimed at estimating the rate of algorithms convergence for a different number of points $K = 10, 20, ..., 200$, randomly located on the plane. In each individual experiment, the iteration numbers $U_1(K)$ and $U_2(K)$ were determined until the Rosenblatt and Kozinets algorithms were stopped, respectively, in accordance with condition (12).

Comparison of numbers $U_1(K)$ and $U_2(K)$ made it possible to determine the leader of a separate experiment, which divided the points for a smaller number of corrections of the discriminant function parameters. Further, the leadership percentage in the series of 5000 experiments was determined (Fig. 7).

The experiments showed that in approximately 20% of cases, with $K < 40$ of observations, both algorithms required the same number of iterations. With the increase in the number of points, Kozinets learning algorithm was an absolute leader (Fig. 7).

At the same time, even with more points in 10% of cases (in one of ten), Rosenblatt algorithm was learned faster than the Kozinets algorithm.

The experiments also showed that the convergence rate of the Rosenblatt algorithm depends not only on the number of points being processed, but also on their location to each other on the plane.

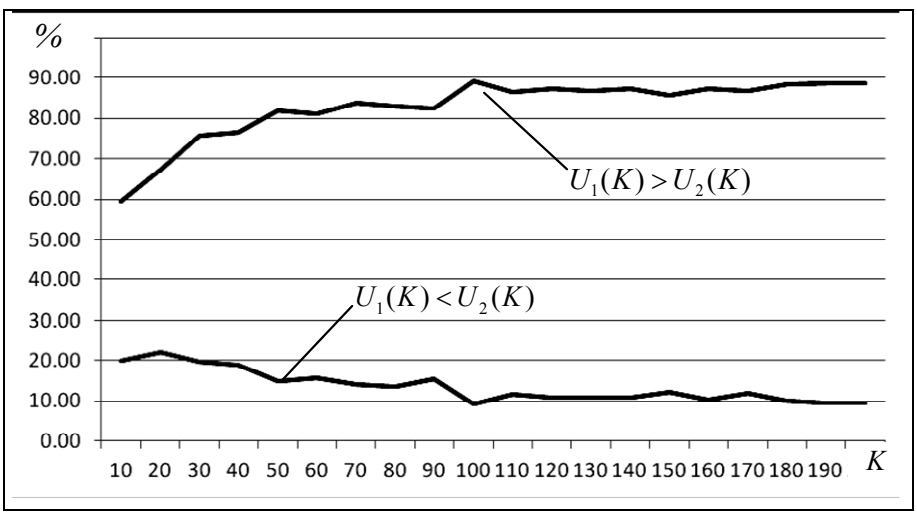

Fig. 7. The graph of the percent dependence of the algorithms leadership on the number of points: $U_1(K) < U_2(K)$ — the leader is the Rosenblatt algorithm; $U_1(K) > U_2(K)$ — the leader is the Kozinets algorithm

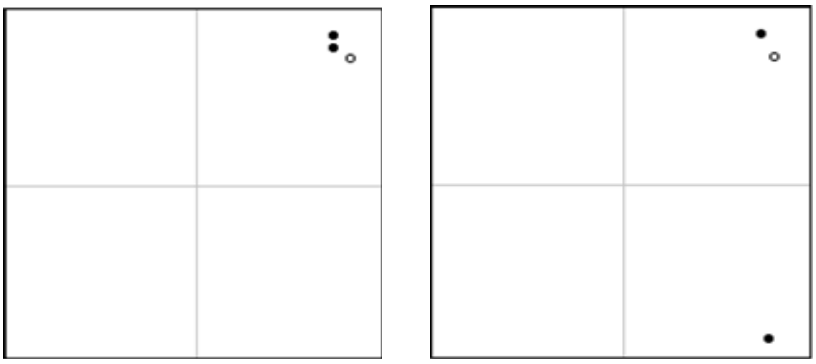

Fig. 8. «Simple» (left) and «difficult» (right) training samples

To illustrate this fact, let's consider the results of multiple learning experiments on two samples, consisting of only three points — two points of the class V_1 and one point of the class V_2 (Fig. 8).

The sample shown in the Fig. 8, left, turned out to be «simple» for both algorithms: for the classes separation the Rosenblatt algorithm required 12 iterations, and the Kozinets algorithm — only one iteration.

At the same time, when the algorithms were learned on a sample shown in the Fig. 8, right, the convergence speeds of the algorithms differed significantly. Kozinets algorithm coped with the problem in just two iterations, at the same time for the Rosenblatt algorithm this sample turned out to be «difficult»: more than 500 iterations were required to separate the points.

For this effect explanation, let`s consider the dynamics of the change in the discriminant function position in the Rosenblatt algorithm learning process for the two samples.

In accordance with expression (7) for case with $N = 2$ the correction of the linear discriminant function`s position

$$w_2 x_2 + w_1 x_1 + w_0 , \tag{13}$$

which occurs when the point is incorrectly classified, is reduced to three operations:

$$w_2^{(t)} = w_2^{(t-1)} + \gamma \delta_\alpha^{(t)} x_2^{(t)}, \tag{14}$$

$$w_1^{(t)} = w_1^{(t-1)} + \gamma \delta_\alpha^{(t)} x_1^{(t)}, \tag{15}$$

$$w_0^{(t)} = w_0^{(t)} + \gamma \delta_\alpha^{(t)} , \tag{16}$$

where $\delta_\alpha^{(t)}$ — classification error.

In the process of learning on a «simple» sample, the dividing line (13) from the initial position (Fig. 9, 1), corresponding to vector $w^{(0)} = (0,0,1)$, gradually changes its direction (Fig. 9, 2–5) and with a relatively small number of itera-

tions takes the final position (Fig. 9, 6), in which the points of the training sample are correctly classified. At the same time, changes in the position of the straight line are mainly due to a change in its slope, determined by the ratio $w_1^{(t)} / w_2^{(t)}$, since the separation of «simple» sampling points practically does not require the displacement of a straight line relative to the origin of coordinates, i.e. correction of attitude $w_0^{(t)} / w_2^{(t)}$.

During the learning of Rosenblatt algorithm for the "difficult" sample, the dynamics of the change in the discriminant function position is completely different (Fig. 10). A distinctive feature of the «difficult» sample from «simple» consists in a significant difference in distances along the vertical $\Delta x_2 = \left| x_2^A - x_2^C \right|$ and horizontal $\Delta x_1 = \left| x_1^A - x_1^C \right|$ between the points A and C of one class:

$$\Delta x_2 >> \Delta x_1 . \tag{18}$$

In other words, in this case the points A and C of one class differ *substantially* in one of the coordinates and practically coincide in the other. This leads to the fact that during the adjustment it is required to change not only the slope of the discriminant function $w_1^{(t)} / w_2^{(t)}$ (Fig. 10, 1–3), but also its displacement $w_0^{(t)} / w_2^{(t)}$ (Fig. 10, 4–9).

Therefore, on a «difficult» sample, the Rosenblatt algorithm, though converging in a finite number of steps (long live the Novikoff theorem!), but the number of such steps is large enough.

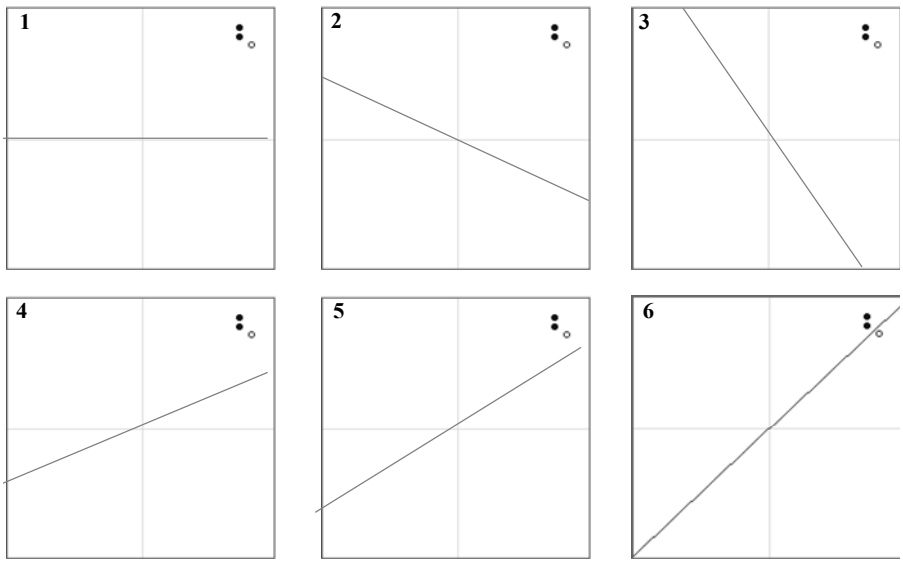

Fig. 9. Stages of the Rosenblatt algorithm learning process on a «simple» sample

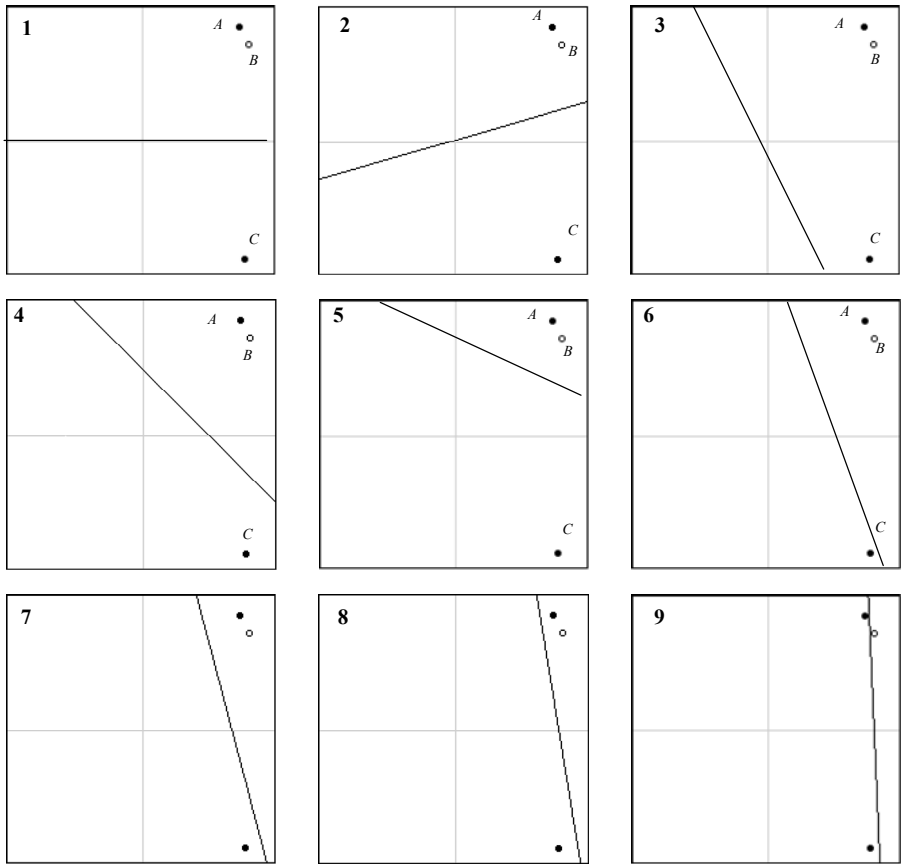

Fig. 10. Stages of the Rosenblatt algorithm learning process on a « difficult » sample

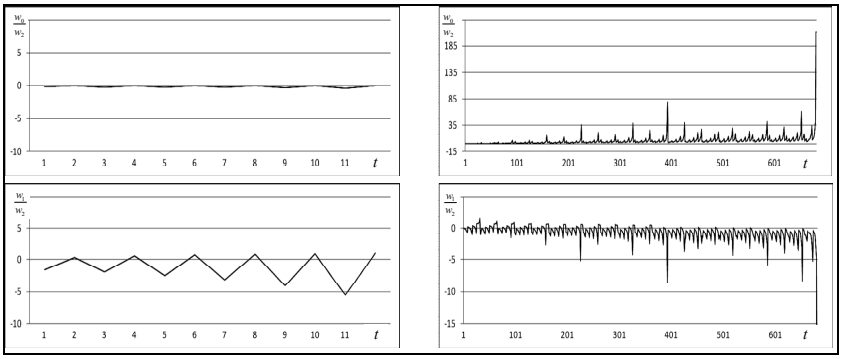

Fig. 11. Dynamics of changes in the slope and displacement of a linear discriminant function on the «simple» (left) and the «difficult» (right) training samples

For illustration, the Fig. 11 shows the dynamics of changing attitudes $w_1^{(t)} / w_2^{(t)}$ and $w_0^{(t)} / w_2^{(t)}$ in the learning process on «simple» (left) and «difficult» (right) samples. It is easy to see that on the «simple» sample the slope of

the discriminant function did not practically change, while on the «difficult» one it varied from 0 to 200 cu.

It's worth paying attention to one important difference between the learning procedures for the Rosenblatt and Kozinets algorithms. As already noted, the Kozinets algorithm provides a search for the first incorrectly classified sampling point, which leads to the next correction of the discriminant function`s parameter vector.

Since the search for such points is carried out randomly, for the acceleration of the learning process, it is advisable at each next stage of viewing the training sample's points to exclude the possibility of *repeatedly* checking the fulfillment of the condition $\langle w, x_k \rangle \cdot c_k > 0$ of correct classification for the same observations x_k, $k \in [1, n]$.

For this purpose, an uncomplicated optimization procedure was developed. It ensures the formation of an observations' reduced subset for the next step in the correction of the parameter vector. Of course, after this step is completed, a new incorrectly classified point is searched for the entire sample of observations.

Statistical experiments showed that on average, usage of the optimization procedure allows accelerating the convergence time of the Kozinets algorithm more than eight times.

During the experiments execution, the analysis of number variation of spent iterations was carried out for the Kozinets algorithm on samples of different volumes. For this, during the multiple learning of the algorithm on a specific sample, the Pearson's variation coefficient was calculated [18] — the ratio of the standard deviation of the iterations number to the average value of the iterations number, expressed as a percentage.

The experiments showed that with increasing number K of points in the sample, the variation coefficient of the iterations number decreases: after increasing the sample size from 10 to 200 points, the variation coefficient of the iterations number decreased by 20% (Fig. 12).

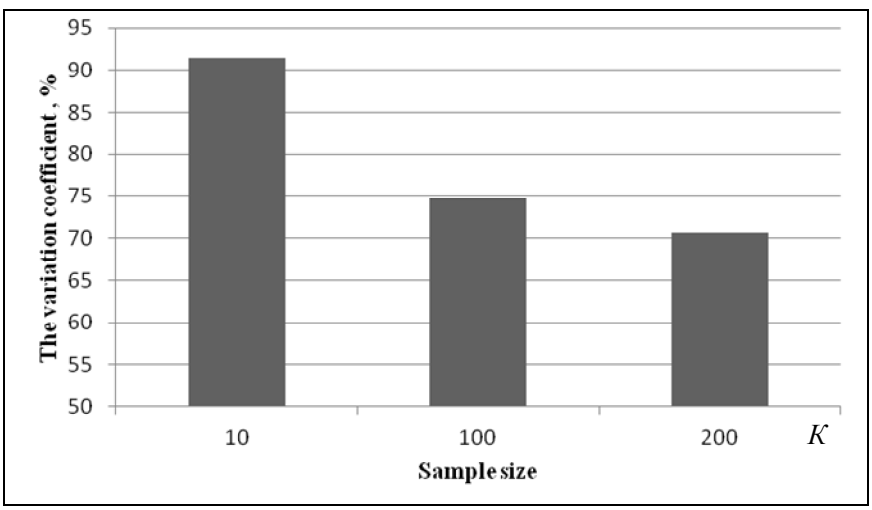

Fig. 12. Dependence of the iterations number variation coefficient of the Kozinets algorithm from the sample size

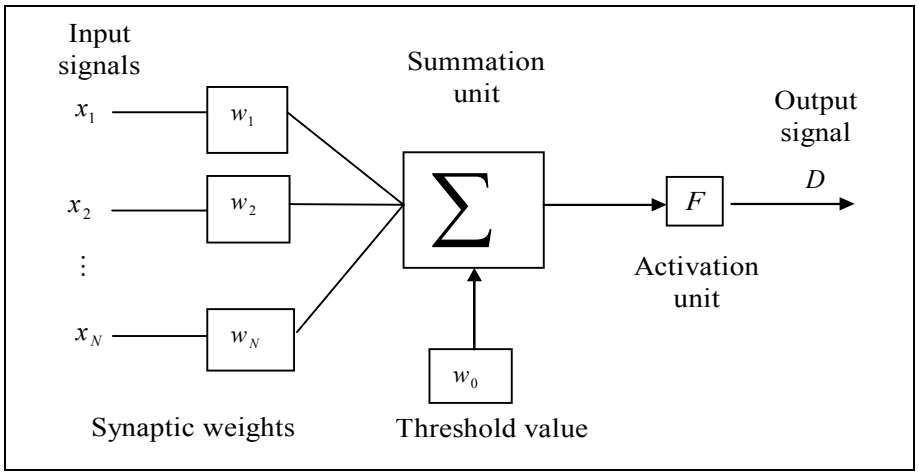

Fig. 13. Rosenblatt single-layer perceptron

Recall that the Rosenblatt learning algorithm suggests the principle of adjusting the linear discriminant function parameters (3), which structurally implements the perceptron scheme (Fig. 13) — the basic element of neural networks [19], which are actively used to solve many applied problems [20].

It is clear that the Kozinets algorithm, in fact, offers an alternative approach to learning the same scheme. The experimental researches that were carried out, which confirmed the high rate of convergence of the Kozinets algorithm, allow to hope that using of this algorithm as the learning one for the basic elements of a neural network will increase their effectiveness. At least, the research of this possibility is promising and will be the subject of our further investigations.

In conclusion, recall that for the learning process characteristics of neural networks used a special term — the «learning epoch» [10], which means the stage of the discriminant function parameters correction for a single viewing of *all* points in the training sample.

It is clear that for the Kozinets learning algorithm the «learning epoch» and the «iteration step» are the equivalent concepts. At the same time, the «learning epoch» for the Rosenblatt algorithm consists of the corrections sequence of the separating function parameters for a single scan of the entire sample and the detection of each incorrectly classified observation.

Taking into account the above interpretations of terms, the comparative analysis of the «learning epochs» number E_1, E_2 that were spent by one and the other algorithms on a series of randomly generated observations in the experiments was carried out.

Experiments have shown that from this point of view, with the points amount $K < 70$ the Kozinets algorithm has an advantage, and as the points amount K increases, the leadership percentage of the Rosenblatt algorithm increases respectively (Fig. 14).

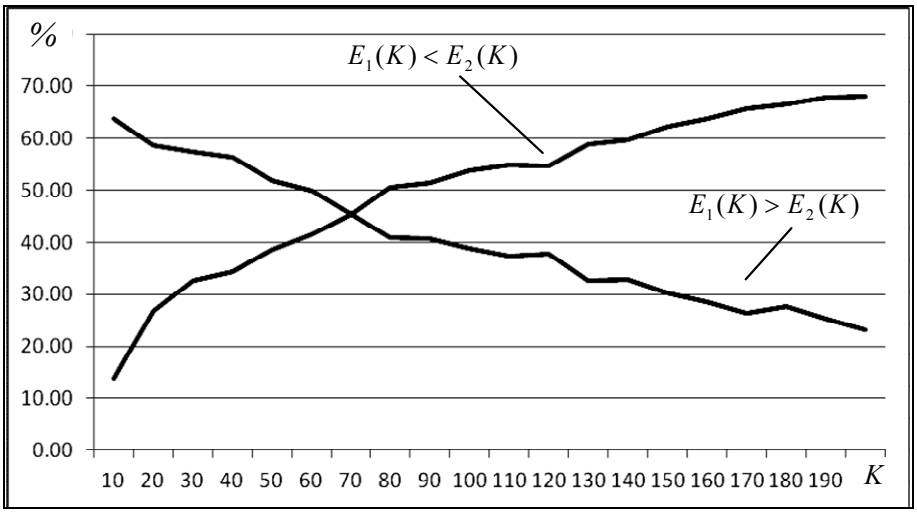

Fig. 14. The graph of the percent dependence of the «learning epochs» number on the observations number: $E_1(K) < E_2(K)$ — the leader is the Rosenblatt algorithm; $E_1(K) > E_2(K)$ — the leader is the Kozinets algorithm

After all, the rate of the learning algorithms convergence mainly characterizes the corrections number of the discriminant function parameters, and hence, from this point of view, the Kozinets algorithm can be considered an uncontested leader, which is illustrated by the Fig. 7.

Thus, the developed software system made it possible to establish previously unknown properties of the Rosenblatt and Kozinets learning algorithms on the basis of a statistical experiments series, to conduct their comparative analysis and outline the prospects for further research on the improvement of neural networks.

CONCLUSIONS

Statistical experiments carried out using the developed software system have shown that for a small sample size the convergence rates of the Rosenblatt and Kozinets algorithms are the same in approximately 20% of cases. With the increase in the number of observations, the Kozinets learning algorithm proved to be the absolute leader and, with a $K > 100$ number of observations, it learned faster than the Rosenblatt algorithm in 90% of the cases.

The convergence rate of the Kozinets learning algorithm is less sensitive to the points location in the training sample and with the increase in the observations number of the variation coefficient, the iterations number decreases.

The higher convergence rate of the Kozinets algorithm compared to the Rosenblatt algorithm, confirmed by a series of statistical experiments, allows formulating a promising line of research on the evolution of neural networks in which the Kozinets algorithm will be used to adjust the basic elements — perceptrons.

REFERENCES

1. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The elements of statistical learning. New York: Springer; 2014. 739 p.
2. Bishop C.M. Pattern recognition and machine learning. New York: Springer; 2006. 738 p.
3. Merkov A.B. Image recognition: Introduction to statistical learning methods. Moscow: URSS; 2011. 256 p. (In Russian).
4. Vapnik, V. The nature of statistical learning theory. New York: Springer-Verlag; 1995. 188 p.
5. Gori M. Machine Learning: A constraint-based approach. — Waltham: Morgan Kaufmann; 2017. 580 p.
6. Kodratoff Y., Michalski R.S. Machine learning: an artificial intelligence approach, Vol. 3. Elsevier; 2014. 825 p.
7. Camastra F., Vinciarelli A. Machine learning for audio, image and video analysis: Theory and Applications. Madrid: Springer; 2015. 561 p.
8. Schlesinger M, Hlavac V. Ten lectures on statistical and structural pattern recognition. Dodrecht/Boston /London: Kluwer Academic Publishers; 2002. 519 p.
9. Burstein F., Holsapple Cl.W. Handbook on decision support systems 2: variations. New York: Springer; 2008. 798 p.
10. Kung S.Y. Kernel methods and machine learning. Cambridge: Cambridge University Press; 2014. 591 p.
11. Rosenblatt F. The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological Review*. 1958. N. 65(6), P. 386–408.
12. Kozinets B.N. A recursive algorithm for dividing the convex hulls of two sets. *Computer Science and Programming.* 1966. N. 4. P. 43–50. (In Russian).
13. Novikoff A.B. On convergence proofs on perceptrons. *Symposium on the Mathematical Theory of Automata*. 1962. N. 12, P. 615–622.
14. Vapnik V.N., Chervonenkis A.J. Theory of pattern recognision. Moscow: Nauka; 1974. 416 p. (In Russian).
15. Buslenko N.P. The method of statistical modeling. Moscow: Statistics; 1970. 113 p. (In Russian).
16. Rubinstein R.Y., Kroese D.P. Simulation and the Monte Carlo method (3 ed.). New York: John Wiley & Sons; 2016. 432 p.
17. Robert C.P., Casella G. Monte Carlo statistical methods (2nd ed.). New York: Springer; 2004. 649 p.
18. Trickey K.A. Structural models of coefficient of variation matrices. Los Angeles: University of California; 2015. 233 p.
19. Kussul E., Baidyk T., Wunsch D.C. Neural networks and micromechanics. New York: Springer Science & Business Media; 2009. 221 p.
20. Misuno I.S., Rachkovskij D.A., Slipchenko S.V. Experimental investigation of handwritten digit classification. *System Technologies*. 2005. Issue 4(39). P. 110–133.

Received 15.03.2018

ЛІТЕРАТУРА

1. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The elements of statistical learning. New York: Springer; 2014. 739 p.
2. Bishop C.M. Pattern recognition and machine learning. New York: Springer; 2006. 738 p.
3. Мерков А.Б. Распознавание образов. Введение в методы статистического обучения. Москва; 2011. 256 с.
4. Vapnik, V. The nature of statistical learning theory. New York: Springer-Verlag; 1995. 188 p.
5. Gori M. Machine Learning: A constraint-based approach. — Waltham: Morgan Kaufmann; 2017. 580 p.
6. Kodratoff Y., Michalski R.S. Machine learning: an artificial intelligence approach, Vol. 3. Elsevier; 2014. 825 p.
7. Camastra F., Vinciarelli A. Machine learning for audio, image and video analysis: Theory and Applications. Madrid: Springer; 2015. 561 p.
8. Schlesinger M, Hlavac V. Ten lectures on statistical and structural pattern recognition. Dodrecht/Boston /London: Kluwer Academic Publishers; 2002. 519 p.

9. Burstein F., Holsapple Cl.W. Handbook on decision support systems 2: variations. New York: Springer; 2008. 798 p.
10. Kung S.Y. Kernel methods and machine learning. Cambridge: Cambridge University Press; 2014. 591 p.
11. Rosenblatt F. The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain, *Psychological Review*. 1958. N. 65(6), P. 386–408.
12. Козинец Б.Н. Рекуррентній алгоритм зазделения віпукліх оболочек двух множеств. *Вычислительная техника и вопросы программирования*. 1966. №. 4. С. 43–50.
13. Novikoff A.B. On convergence proofs on perceptrons. *Symposium on the Mathematical Theory of Automata*. 1962. N. 12, P. 615–622.
14. Вапник В.Н., Червоненкис А.Я. Теория распознавания образов. Москва: Наука; 1974. 416 с.
15. Бусленко Н.П. Метод статистического моделирования. Москва: Статистика; 1970. 113 с.
16. Rubinstein R.Y., Kroese D.P. Simulation and the Monte Carlo method (3 ed.). New York: John Wiley & Sons; 2016. 432 p.
17. Robert C.P., Casella G. Monte Carlo statistical methods (2nd ed.). New York: Springer; 2004. 649 p.
18. Trickey K.A. Structural models of coefficient of variation matrices. Los Angeles: University of California; 2015. 233 p.
19. Kussul E., Baidyk T., Wunsch D.C. Neural networks and micromechanics. New York: Springer Science & Business Media; 2009. 221 p.
20. Misuno I.S., Rachkovskij D.A., Slipchenko S.V. Experimental investigation of handwritten digit classification. *System Technologies*. 2005. Issue 4(39). P. 110–133.

Получено 15.03.2018

Л.С. Файнзільберг[1], д-р техн. наук, проф.,
голов. наук. співроб. відд. інтелектуальних автоматичних систем
e-mail: fainzilberg@gmail.com
Н.А. Матушевич[2], магістрант
факультет біомедичної інженерії
e-mail: natalie.matushevych@gmail.com
[1] Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем НАН України та МОН України,
пр. Академіка Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна
[2] Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ШВИДКОСТІ ЗБІЖНОСТІ АЛГОРИТМІВ НАВЧАННЯ ЛІНІЙНИХ КЛАСИФІКАТОРІВ ЗА МЕТОДОМ СТАТИСТИЧНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

Розглянуто алгоритми лінійної класифікації Ф. Розенблата та Б.Н. Козинця. Проведено експериментальні дослідження збіжності алгоритмів на різних вибірках даних. Наведено результати статистичних експериментів для оцінювання швидкості збіжності алгоритмів Козинця та Розенблата, залежності результатів від розташування елементів в вибірці та варіації кількості ітерацій алгоритмів під час навчання на вибірках різного обсягу.

Більша швидкість збіжності алгоритму Козінца у порівнянні з алгоритмом Розенблатта, що підтверджено серіями проведених статистичних експериментів, дозволяє сформулювати перспективний напрямок досліджень з розвитку нейронних мереж, в яких алгоритм Козінца буде використано для настройки базових елементів — персептронов.

Ключові слова: *лінійний класифікатор, алгоритм Розенблата, алгоритм Козинця, персептрон.*

Л.С. Файнзильберг[1], д-р техн. наук, проф.,
глав. науч. сотр. отд. интеллектуальных автоматических систем
e-mail: fainzilberg@gmail.com
Н.А. Матушевич[2], магистрант
факультет биомедицинской инженерии
e-mail: natalie.matushevych@gmail.com
[1] Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины,
пр. Академика Глушкова, 40, г. Киев, 03187, Украина
[2] Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»,
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СКОРОСТИ СХОДИМОСТИ АЛГОРИТМОВ ОБУЧЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ КЛАССИФИКАТОРОВ МЕТОДОМ СТАТИСТИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Введение. Одной из главных задач искусственного интеллекта является распознавание образов, которое довольно часто сводится к определению параметров дискриминантной функции в многомерном пространстве признаков. Когда распознаваемые объекты могут быть полностью разделены линейной дискриминантной функцией, задача сводится к обучению линейного классификатора. Существует множество алгоритмов обучения линейных классификаторов, два из которых — алгоритм обучения Розенблатта и алгоритм Козинца.

Цель статьи — исследовать свойства алгоритмов обучения Розенблатта и Козинца на основе проведения статистического эксперимента методом Монте-Карло.

Методы. Исследованы два алгоритма обучения линейных классификаторов: Розенблатта и Козинца. Проведен ряд исследований для сравнения скорости сходимости алгоритмов при различном числе точек и их расположении. Проанализирована вариация количества затраченных итераций алгоритмами на выборках разного объема.

Результаты. Экспериментальные исследования позволили определить, что при малом объеме выборки приблизительно в 20 % случаев скорости сходимости алгоритмов Розенблатта и Козинца одинаковы, но с увеличением количества наблюдений алгоритм обучения Козинца оказывался абсолютным лидером. Также скорость сходимости алгоритма обучения Козинца менее чувствительна к расположению точек в обучающей выборке.

Выводы. Более высокая скорость сходимости алгоритма Козинца по сравнению с алгоритмом Розенблатта, подтвержденная сериями проведенных статистических экспериментов, позволяет сформулировать перспективное направление исследований по развитию нейронных сетей, в которых алгоритм Козинца будет использован для настройки базовых элементов — персептронов.

Ключевые слова: *линейный классификатор, алгоритм Розенблатта, алгоритм Козинца, персептрон.*

DOI: https://doi.org/10.15407/kvt192.02.023

УДК 681.3.

В.І. ГРИЦЕНКО[1], член-кореспондент НАН України,
директор Міжнародного науково-навчального центру
інформаційних технологій та систем НАН України та МОН України
e-mail: vig@irtc.org.ua
А.Я. ГЛАДУН[1], канд.техн.наук, старш. наук. співроб.,
відд. комплексних досліджень інформаційних технологій та систем
email: glanat@yahoo.com
Ю.В. РОГУШИНА[2], канд.фіз.-мат. наук, старш. наук. співроб.,
відд. автоматизованих інформаційних систем
ladanandraka2010@gmail.com
[1] Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних
технологій та систем НАН України та МОН України,
пр. Академіка Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна
[2] Інститут програмних систем НАН України,
пр. Академіка Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна

МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ВИКОРИСТАННЯ СЕМАНТИЧНИХ WIKI-РЕСУРСІВ ЯК ДЖЕРЕЛА ЗНАНЬ ДЛЯ ПОПОВНЕННЯ ФОРМАЛЬНИХ ОНТОЛОГІЙ ПРЕДМЕТНИХ ОБЛАСТЕЙ

Розглянуто доцільність застосування онтологій для подання знань у системах штучного інтелекту, орієнтованих на функціонування у відкритому середовищі Web. Проаналізовано дослідження, пов'язані з побудовою формальних онтологій предметних областей, та засоби їх формалізації. Запропоновано формальну модель онтології, що уточнює наявні підходи та більш детально описує властивості та характеристики відношень між основними елементами онтології. Запропоновано використання такої моделі як основи для співставлення онтології з дескриптивними логіками. Подано метод поповнення онтології предметної області, який базується на запропонованій моделі та використанні семантично розмічених Wiki-ресурсів як джерела знань. Це забезпечує динамічне поповнення бази знань прикладних інтелектуальних систем. Наведено приклад використання запропонованого методу у задачі перетворення природномовного тексту в жестову мову в системі інформаційної підтримки осіб з вадами мовлення та слуху.

***Ключові слова**: формальна онтологія, онтологічні мови, формальна модель онтології, інтерпретація онтологій, семантичні Wiki-ресурси, інформаційна система.*

ГРИЦЕНКО В.І., ГЛАДУН А.Я., РОГУШИНА Ю.В., 2018

ВСТУП

Побудова і впровадження інтелектуальних систем, що ґрунтуються на формалізації та повторному використанні знань, є перспективним напрямом практичного застосування методів штучного інтелекту. Основу таких систем складають формалізовані подання знань про предметну область, наприклад, у формі онтології. Визначення онтології Грубером [1] як специфікації певної концептуалізації залишає відкритим питання вибору формального апарату та мовних засобів для побудови такої специфікації. Також залишаються не повністю вирішеними завдання аналізу та виявлення суті онтологічного опису предметної області, визначення властивих йому обмежень та переваг. Усе це вимагає побудови та дослідження формальних моделей для різноманітних аспектів онтологічного моделювання. Отже, актуальним є дослідження методів онтологічного моделювання з використанням формальних онтологій предметних областей (ПрО) та систем онтологічного моделювання.

Формальні онтології предметних областей зараз широко використовуються різноманітними інтелектуальними Web-застосунками для інтероперабельного подання знань. Основну роль у процесі створення моделей знань про ПрО відіграють онтології — знання, організовані на основі математичної логіки.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

На відміну від динамічних Wiki-ресурсів, онтології є відносно стабільними моделями знань, однак часто не враховують змін в знаннях, особливо у нових предметних областях і тому містять застарілі дані. Оновлювати версії онтологій вручну занадто складно та дорого. Найбільш ефективним підходом є використання структури класів вже наявної онтології для семантичної розмітки Wiki-ресурсу, який може змінюватись досить часто, а потім за цією розміткою автоматизовано генерувати нові версії вказаної онтології, які можна зберігати у репозиторії онтологій.

Для того, щоб оцінити складність цієї оновлюваної онтології, тобто пов’язати її з певною конкретною логікою з сімейства дескриптивних логік, необхідно перш за все явно визначити всі характеристики формальної моделі цієї онтології. Здобути ці відомості з семантичного Wiki-ресурсу, на жаль, неможливо. Це пов’язано з тим, що, незважаючи на велику подібність онтології та семантичного Wiki, вони мають все ж таки зовсім різну виразність. Таким чином, ця частина роботи не може бути автоматизованою – якщо виникають такі зміни, то їх має вносити людина. Характеристики формальної моделі онтології можна імпортувати з попередньої версії онтології ПрО та змінювати тільки тоді, коли ці характеристики онтології дійсно змінюються. Для того, що б явно вказати, з яких джерел та які саме знання треба здобувати, ми пропонуємо розширену, детальнішу формальну модель онтології ПрО.

Метою роботи є розроблення моделей структурованого подання знань у Wiki -ресурсах на основі онтологій та методів їх застосування для вдосконалення та поповнення онтологій ПрО. Запропонований підхід надасть

змогу інтегрувати поточні відомості про зміни у предметній області та створювати актуальні онтології для різних прикладних інформаційних технологій (ІТ), що використовують онтології.

ФОРМАЛЬНА ОНТОЛОГІЯ ЯК ЗАСІБ ОПИСУ ЗНАНЬ ПРЕДМЕТНИХ ОБЛАСТЕЙ

До ІТ цей термін пришов з філософії, де формальні онтології (Ф. Брентано, Е. Гуссерль, Г. Фреге, К. Твардовський, А. Райнах, Н. Коккьярелла, С. Лесьневський, Р. Карнап, Р. Полі) відображають взаємозв'язки об'єктів (реальних та віртуальних) з їх властивостями та частинами [2–5].

Дослідження формальних онтологій у філософії — це галузь досліджень, яка із самого початку нерозривно пов'язана з логікою та її апаратом і походить ще від таких робіт Аристотеля, як «Метафізика» і «Категорії». Докладніше це проаналізовано у [6].

Термін «формальна онтологія» було вперше введено Е. Гуссерлем у його «Логічних дослідженнях» (1901), де він розрізняє формальну логіку з одного боку, та формальну онтологію — з іншого. Формальна логіка має справу з взаємозв'язками виводимості, несуперечністю і загальною значущістю певних тверджень, тоді як формальна онтологія стосується взаємозв'язків об'єктів та їх властивостей [2]. Логіка вважається формальною тому, що відношення виводимості можуть бути застосовані до логічних висновків у силу лише своєї форми, тоді як онтологія вважається формальною в тому розумінні, що оперує довільними об’єктами та їх відношеннями з об'єктами всіх матеріальних сфер чи областей реальності.

Е. Гуссерль у своїх роботах не використовує будь-який формальний апарат у сучасному розумінні змісту цього слова. Його теорія не охоплює вертикальні відношення між частинами і цілим та стосується інтуїтивних основ і понять для розроблення систем формальної онтології [2].

Однак є інший підхід до формальних онтологій, який не ґрунтується на мереології. Мереологія (від грецького «частина» і «вивчення») — формальна теорія про частини і пов’язані з ними поняття. Цей термін використано польським математиком Станіславом Лесьневським (львівсько-варшавська математична школа) [7], який аналізує філософські, логічні і математичні складники основ математики. Відношення «частина-ціле» є винятково важливим тому, що воно утворює основу поняття системи, яке часто використовують в сучасному науковому пізнанні. У мереології відношення «є частиною» (part-of) має такі властивості: 1) асиметрія; 2) транзитивність. Цю теорію розвивали К. Айдукевич, А. Тарський, Т. Котарбінський [8].

Таким чином, особливе місце серед формальних онтології займає система С. Лесьневського, яка складається з трьох компонентів — мереології, онтології та прототетики. Його онтологія задовольняє визначенню формальної онтології в розумінні Н. Коккьяреллі, у той час як його інша система — мереологія, що надбудовується над онтологією, підпадає під визначення формальної онтології Е. Гуссерля. Онтологія С. Лесьневського є як логічною системою, так і системою формальної онтології.

Н. Коккьяреллі визначає формальну онтологію як теорію буття з точки зору формальної логіки. Вважаючи, що кожна наука розглядає свій специфічний «спосіб існування», він стверджує, що формальна онтологія вивчає

різні формалізації, які належать до систематичної класифікації всіх «способів» чи категорій існування в самому загальному вигляді.

Р. Полі в «Формальній онтології» розглядає такі типи онтологій [2]: *онтологія об'єктів і властивостей,* яка описує сутність об'єктів з їх властвостями *стратифікована онтологія*, яка описує світ у категоріях залежності; *онтологія подій*, яка описує динамічні сутності; *комбінаторна онтологія*, яка описує універсум як композицію елементів і комбінацію елементів; *трансформаційна онтологія*, яка враховує внутрішні і зовнішні трансформації; *онтологія ментальних конструкцій*, яка описує ментальну активність безпосереднього споглядання та не розглядає факти зовнішнього світу.

Крім того, Р. Полі класифікує онтології за рівнем формалізації на дескриптивні, формальні та формалізовані, а за залежністю від конкретної предметної області — на локальні і глобальні онтології.

Дескриптивна онтологія має справу із сукупностями об'єктів, ґрунтується на поверхневій наочній інформації та описує ці сукупності (в деякій ПрО або глобально).

Формальна онтологія фільтрує, кодує та організує результати дескриптивної онтології (як локальної, так і глобальної). Така онтологія є формальною в розумінні Е. Гуссерля, тобто має справу з такими категоріями, як мовлення, процес, матерія, ціле, частина, число, які характеризують різні аспекти чи типи реальності, але не використовують будь-які специфічні формалізми. Формальне кодування в строгому значенні цього слова застосовують тільки на третьому рівні — на рівні побудови формалізованої онтології. Рівень формалізованих конструкцій також припускає оцінювання виразної, обчислювальної, когнітивної адекватності різних формалізмів.

Формалізована онтологія обов'язково припускає вибір формалізму, що потребує вибору певної формальної мови для опису онтології. Потреба в подібних мовах давно вже почала відчуватися розробниками систем штучного інтелекту.

Конструюванням таких формальних мов займаються Б. Сміт і К. Малліган [6], які прагнуть будувати мови на зовсім інших засадах (на відміну від того, як це робиться в логіці) та наводять опис онтологічної мови типу діаграм Венна. Але ця розробка не була орієнтована на ІТ.

ФОРМАЛЬНІ МОВИ ПОДАННЯ ОНТОЛОГІЙ ТА ЇХНЯ ВИРАЗНА ПОТУЖНІСТЬ

GOL (General Ontological Language — загальна онтологічна мова) було розроблено у 2001 р (Б. Сміт, Б. Хеллер, Х. Херре і В. Деген) для описування онтології верхнього рівня, орієнтованої на завдання медичної діагностики. На відміну від інших проектів подібного роду, GOL не є теоретико-множинною мовою [9–10]. У цьому проекті вихідні сутності реального світу поділяються на множини, індивіди та універсалії. Індивіди, у свою чергу, розділяються на моменти, субстанції, хроноїди, топоїди і ситуоїди.

KIF (Knowledge Interchange Format — формат обміну знаннями) — формальна мова для обміну знаннями між комп'ютерними програмами, написаними різними програмістами в різний час і на різних мовах. Онтологія цього проекту використовує об'єкт як найбільш широку категорію. Об'єкти можуть бути конкретними (пристрій, людина, молекула) або абстрактними (поняття

справедливості, число «два»), простими чи складними. Крім того, об’єкти поділяються на індивіди і множини. Множина є сукупністю об'єктів, індивідом є об'єкт, який не є множиною. Функції та відношення вводяться як множини скінчених списків. Онтологічний базис KIF слабкіший за базис GOL: KIF можна розглядати як теоретико-множинну підмножину GOL.

F-Logic — онтологічна мова, що базується на логіках першого порядку, однак класи і властивості в цій мові надано як терміни, а не як предикати. Мова створювалася для здійснення взаємодії між онтологіями, побудованими на основі предикатів, і онтологіями, побудованими на основі F-Logic. Такий переклад зберігає логічні зв'язки для великої кількості онтологічних мов, у тому числі і для OWL DL.

OCML (Operational Conceptual Modeling Language) — мова, розроблена для підтримки кількох типів конструкцій подання знань. Вона дозволяє задавати специфікацію й операціоналізацію функцій, зв'язків, класів, екземплярів і правил. Мова містить механізми для опису онтологій і методів рішення задач.

LOOM — мова подання знань і міркувань в галузі штучного інтелекту. Вона використовується для побудови дедуктивних виведень на основі декларативних знань.

В рамках проекту Semantic Web розроблено стандарт мови OWL. Онтологія OWL (Web Ontology Language) є послідовністю аксіом і фактів, а також посилань на інші онтології [1]. OWL-онтології містять компоненти для запису авторства та іншої необхідної інформації. OWL-онтології є документами Web, на них можна посилатися через URI (Uniform Resource Identifier). Мова OWL розширює мову RDF(S) (Resource Description Framework Schema)і забезпечує конструкції для вираження понять, відношень, потужності, анотацій та конкретизації понять тощо. Окрім того, OWL підтримується великою кількістю редакторів онтологій та різонерів. Все це дозволяє назвати OWL найбільш релевантною мовою для Semantic Web. OWL має три діалекти, що різняться за виразністю:

- OWL Lite (простота створення онтологій);
- OWL DL (повнота та можливість логічного виведення);
- OWL Full (висока виразність).

Кожен з цих діалектів (окрім Lite) є розширенням попереднього. Як наслідок, будь-яка OWL Lite онтологія є OWL DL онтологією, а будь-яка OWL DL онтологія є OWL Full онтологією.

OWL Lite — найпростіший варіант, призначений для тих користувачів, які потребують класифікації ієрархії і використовують прості обмеження. OWL Lite забезпечує швидку міграцію тезаурусів і інших таксономій.

OWL DL орієнтований на тих користувачів, які потребують максимальної виразності без втрати повноти обчислень та гарантованого завершення всіх обчислень у визначений час. OWL DL містить всі мовні конструкції OWL з обмеженнями поділу типу (клас не може бути приватною властивістю, а властивість — індивідом або класом). Терміни «приватний» або «публічний» є так званими «модифікаторами» доступу, тому що в деяких мовах вони використовуються для зміни раніше встановлених прав у спадкуванні класу. Назву OWL DL пов’язано з його відповідністю дескриптивній логіці.

OWL Full призначається для користувачів, яким потрібна максимальна виразність і синтаксична потужність RDF без обчислювальних гарантій. Наприклад, у OWL Full клас може одночасно розглядатися і як сукупність екземплярів, і як окремий екземпляр. Інша суттєва відмінність від OWL DL полягає у тому, що owl:DatatypeProperty може бути позначена як owl:InverseFunctionalProperty. OWL Full дозволяє створювати такі онтології, які розширюють склад визначеного словника RDF або OWL.

Формально описати OWL-онтологію можна таким чином:

```
<ontology> ::= Ontology ( [<authorship-etc>] {<directive>} )
<authorship-etc> ::=...
<directive> ::= <imports>
<directive> ::= <axiom>
<directive> ::= <fact>
<imports> ::= imports ( <URI> )
```

Найфундаментальніші поняття певної ПрО мають відповідати класам, що знаходяться в корені різних таксономічних дерев. Кожен екземпляр в онтології OWL належить до класу owl:Thing, а кожен встановлений користувачем клас автоматично є підкласом owl:Thing. Специфічні для ПрО кореневі класи визначаються простим оголошенням іменованого класу. OWL також задає порожній клас: owl:Nothing. Визначення можуть бути розширюваними і розподіленими.

Фундаментальним таксономічним конструктором для класів є rdfs:subClassOf. Він зв'язує окремий клас з загальним: якщо X — підклас Y, то кожен представник X — також представник Y. Відношення rdfs:subClassOf є транзитивним: якщо X — підклас Y, і Y — підклас Z, то X — підклас Z.

Визначення класу містить дві частини: назву або посилання на клас та список обмежень. Кожен вираз, який безпосередньо міститься у визначенні класу, уточнює властивості представників цього класу. Представники класу належать до перетину зазначених обмежень. Для визначення екземпляра досить оголосити його членом якогось класу.

Характеристика «властивості» дозволяє затверджувати загальні факти про членів класів і про екземпляри. Вони є бінарними відношеннями. Розрізняють два типи властивостей: *властивості-значення* — відношення між представниками класів і RDF-літералами або типами даних, зумовлених XML Schema та *властивості-об'єкти* — відношення між представниками двох класів.

Для надання властивості є багато способів обмежити це відношення. Можна задати домен і діапазон. Властивість може бути визначена як спеціалізація (підвластивість) наявної властивості. Можливі і складніші обмеження. Властивості, так само як класи, можуть бути організовані в ієрархію.

OWL використовує більшість вбудованих типів XML Schema. Посилання на ці типи здійснюються за допомоги URI для http://www.w3.org/2001 /XMLSchema. Формальна семантика OWL описує, як отримати логічні наслідки, маючи таку онтологію, тобто здобути факти, що не надано в ній безпосередньо, проте випливають з її семантики. Ці наслідки можуть бути основані на одному або множині розподілених документів, які комбінуються з використанням спеціальних механізмів OWL.

ФОРМАЛЬНІ МОДЕЛІ ОНТОЛОГІЙ

Аналіз публікацій доводить, що саме онтології є адекватним та ефективним засобом для моделювання уявлень про різні ПрО і дають змогу формально відображати їх семантику. Різні наукові джерела містять різноманітні формальні моделі подання онтологій , проте схожими рисами в них є *множина термінів* (понять, концептів), що може поділятися на множину класів і множину екземплярів, *множина відношень між поняттями*, у якій можна виділити відношення з певними фіксованими наборами властивостей — «клас-підклас», ієрархічні (таксономічні) відношення та відношення синонімії (подібності), та *аксіоми та функції інтерпретації понять і відношень*.

Будь-яка онтологія, крім множини об’єктів предметної області (класів та екземплярів), що включає характеристики об'єктів і процесів предметної області, містить опис важливих залежностей між цими об'єктами.

Формальну модель онтології можна надати у вигляді трійки

$$O = <X, R, F>,$$

де X — множина концептів, R — множина відношень між концептами, F — множина функцій інтерпретації концептів з множини X і відношень з R.

На змістовному рівні за допомоги елементів F можна вказати (задати правила визначення припустимості), по-перше, які набори концептів, їх відношень та значень їх властивостей є припустимими для ПрО — наприклад, дитина не може бути старшою за батьків, книга не може бути написана раніше дати народження її автора, препарат не може одночасно підвищувати та знижувати тиск; а по-друге, які значення властивостей та відношення між концептами можна вивести з наявної в онтології інформації – наприклад, сусід сусіда є сусідом.

Така модель має загальний характер, у той час як на практиці користуються точнішими моделями. Наприклад, у [11] онтологія визначається як структура

$$O = \langle C,\ \leq_c,\ R,\ \sigma_R,\ \leq_R,\ A,\ \sigma_A,\ T \rangle,$$

яка складається з: чотирьох множин C, R, A і T, які не перетинаються і елементи яких називають відповідно ідентифікаторами концептів, ідентифікаторами відношень, ідентифікаторами атрибутів і типами даних; структури часткового упорядкування $\leq_c$ над C з верхнім елементом $root_C$ (ієрархія концептів чи таксономією); функції $\sigma_R : R \to C^+$ (ідентифікатор, чи сигнатура відношення; часткового упорядкування $\leq_R$ над R (ієрархія відношень), де $r_1 \leq_R r_2$ означає, що $|\sigma_R(r_1)| = |\sigma_R(r_1)|$ і $\pi_i(\sigma_R(r_1)) \leq_R \pi_i(\sigma_R(r_2))$ для $\forall i : 1 \leq i \leq |\sigma_R(r_1)|$ ($\pi_i(t)$ — це і-й компонент кортежу t); функції $\sigma_A : A \to C \times T$ (ідентифікатор, чи сигнатура атрибута); безлічі типів даних T (наприклад, рядок, ціле).

Для структури $\leq$ виконуються такі умови: рефлективність, антисиметричність, транзитивність, наявність верхнього елемента і супремум.

У [12] онтологія визначається як кортеж

$$O = \langle C,\ I,\ R,\ T,\ V,\ \leq,\ \perp,\ \in,\ = \rangle,$$

в якому C — множина класів; I — множина екземплярів; R — множина відношень; T — множина типів даних; V — множина значень (множини C, I, R, T, V попарно не перетинаються); $\leq$ — відношення на $(C\times C)\cup(R\times R)\cup(T\times T)$, що називається спеціалізацією; $\perp$ — відношення на $(C\times C)\cup(R\times R)\cup(T\times T)$, що називається виключенням; $\in$ — відношення на $(I\times C)\cup(V\times T)$, яке називають реалізацією (створенням екземпляра); = відношення на $I\times P\times\cup(I\cup V)$, яку називають присвоюванням.

Така онтологія може бути перетворена у граф, вузли якого є типами.

Семантику онтологічних мов, яка описує відношення мовних виразів до позначених об'єктів та їхнього змісту [6], зазвичай подають за допомоги теорії моделей. Зокрема, вона визначає функцію інтерпретації, що відображає кожен елемент онтології на множину D — область інтерпретації.

Інтерпретацією онтології $O=\langle C,\ I,\ R,\ T,\ V,\ \leq,\ \perp,\ \in,\ =\rangle$ є пара $\langle I,D\rangle$, у якій D — область інтерпретації, а I — функція інтерпретації, така, що:

- $\forall c\in C, I(C)\subseteq D$;
- $\forall r\in R, I(r)\subseteq D\times(D\cup V)$;
- $\forall i\in I, I(i)\subseteq D$;
- $\forall t\in T, I(t)\subseteq V$;
- $\forall v\in V, I(v)\subseteq V$.

Твердження онтології задовольняє інтерпретації, якщо інтерпретація узгоджується з цим твердженням.

Узагальненою моделлю онтології $O=\langle C,\ I,\ R,\ T,\ V,\ \leq,\ \perp,\ \in,\ =\rangle$ є інтерпретація $m=\langle I,D\rangle$, яка задовольняє всім твердженням онтології о: $\forall\sigma\in o, m\models\sigma$. Зазначимо, що на практиці використовують точніші моделі з розкриттям її елементів. Для цих моделей вже можна розглядати їх інтерпретацію.

Для описання онтологій ми будемо використовувати формальну модель $O=\langle X,R,F,T\rangle$, яка складається з таких елементів:

$X=X_{cl}\cup X_{ind}$ — множина концептів онтології, де X_{cl} — множина класів, X_{ind} — множина екземплярів класів, таких, що $\forall a\in X_{ind}\exists A\in X_{cl}, a\in A$;

$R=r_{ier_cl}\cup\{r_i\}\cup r_{ier_prop}\cup\{p_j\}\cup p_{ier_prop}$ — множина відношень між елементами онтології, де r_{ier_cl} — ієрархічні відношення між класами онтології (структури часткового впорядкування з верхнім елементом Thing, що можуть встановлюватися між класами онтології і характеризується такими властивостями, як антисиметричність і транзитивність), $r_{ier_cl}: X_{cl}\to X_{cl}$; $\{r_i\}$ — множина об'єктних властивостей, що встановлюють відношення між екземплярами класів: $r_i(a, a\in X_{ind})=b, b\in X_{ind}$, $r_i: X_{ind}\to X_{ind}$; r_{ier_prop} — ієрархічні відношення між об'єктними властивостями класів онтології (структури часткового впорядкування з верхнім елементом topObjectProperty, які можуть встановлюватися між класами

онтології і властивостями класів і характеризуються такими властивостями, як антисиметричність і транзитивність), $r_{ier_prop} : \{r_i\} \to \{r_i\}$; $\{p_j\}$ — множина властивостей даних, які встановлюють відношення між екземплярами класів і значеннями з T: $p_i(a, a \in X_{ind}) = t, t \in T$, $p_i : X_{ind} \to T$; $\mathrm{p}_{\mathrm{ier_prop}}$ — ієрархічні відношення між властивостями даних екземплярів класів онтології (структури часткового впорядкування з верхнім елементом topDataProperty, які можуть встановлюватися між властивостями екземплярів класів онтології і характеризуються такими властивостями, як антисиметричність і транзитивність), $p_{ier_prop} : \{p_i\} \to \{p_i\}$;

$F = \{F_{cl} \cup F_{prop}\}$ — множина характеристик, які можна використати для логічного виведення над онтологією та задати правила ПрО: F_{cl} — множина характеристик класів онтології, що можуть застосовуватися для логічного виводу (еквівалентність, відсутність перетину тощо), F_{prop} — множина характеристик об'єктних властивостей екземплярів класів онтології, які можна застосувати для логічного виводу (транзитивність, симетричність, антисиметричність, рефлексивність, антирефлексивність тощо);

T — множина типів даних (наприклад, рядок, ціле), значення з яких можуть приймати властивості класів онтології.

ОНТОЛОГІЇ ТА ДЕСКРИПТИВНІ ЛОГІКИ

Формальна модель онтології значно спрощує співставлення її з дескриптивними логіками (DL): наявність чи відсутність певних елементів у моделі визначає складність структури цієї онтології та дозволяє робити висновки щодо складності її оброблення. DL — це сімейство мов подання знань, яке слугує для описання понять предметної області у формалізованому вигляді. Будь-яка логіка DL є логікою першого порядку, але не навпаки. Дескриптивні логіки поєднують у собі, з одного боку, досить багаті виражальні можливості, а з іншого — задовільні обчислювальні властивості, такі, як можливість розв'язання й відносно невисока обчислювальна складність основних логічних проблем, що дає змогу використовувати їх на практиці.

ALC (Attributive Language with Complements, атрибутивна мова з доповненнями) — це підмножина сімейства DL, на якій базується мова OWL; водночас для багатьох реальних онтологій цілком достатньо мови ALC, яка дає змогу описувати складні поняття за допомоги таких конструкторів класів, як перетин, об'єднання, доповнення класу, універсальне та екзистенційне обмеження властивості. Для характеристики інших DL використовують такі позначення: F — функціональні властивості; E — повна екзистенціальна кваліфікація (екзистенціальні обмеження, крім owl:Thing); U — об'єднання понять; C — складне заперечення поняття; S — логіка ALC з транзитивністю ролей; H — ієрархія ролей (підвластивості rdfs:subPropertyOf), R — обмежені складні аксіоми включення ролей; рефлексивність і антирефлексивність; диз'юнктивність ролей; O — номінали (перелічувані класи обмежень значення об'єкта owl:oneOf, owl:hasValue); I — зворотні (інверсні) властивості; N — обмеження потуж-

ності (restrictions (owl:cardinality, owl:maxCardinality)); Q — кваліфіковані обмеження потужності (наявні в OWL 2.0, обмеження потужності, відмінні від owl:Thing);(D) — використання типів даних властивостей, значень даних або типів даних.

ІНТЕРПРЕТАЦІЯ ОНТОЛОГІЙ

Для використання онтології потрібно, крім її формальної моделі, задати її семантику, тобто визначити зміст її елементів. Семантика цієї моделі може бути визначена за допомоги функції інтерпретації. Інтерпретацією онтології $O = \langle X, R, F \rangle$ є пара $\langle I, D \rangle$, у якій функція інтерпретації (I) така, що для кожного класу та екземпляра онтології є значення їх функції інтерпретації з області інтерпретації:

$$\forall x \in X, I(x) \subseteq D .$$

Те, що твердження o_k онтології O (синтаксично правильна формула відповідної онтологічної мови, яка пов'язує екземпляри або класи онтології за допомоги відношень) задовольняє інтерпретації $\langle I, D \rangle$, позначається як $I \models o_k$). Відповідно до специфіки інтерпретації онтологій O, твердження задовольняє інтерпретації $\langle I, D \rangle$, якщо виконуються умови, пов'язані з r_{ier_cl}, r_{ier_prop}, p_{ier_prop} та тими елементами множини $F = \{ F_{cl} \cup F_{prop} \}$, що використовуються в онтології.

Зберігається ієрархія класів:

$I \models r_{ier_cl}(c_1, c_2), c_1 \in X_{cl}, c_2 \in X_{cl}$ тоді й тільки тоді, коли $I \models c_1$ є підмножиною $I \models c_2$;

$I \models r_{ier_cl}(c_1, c_2), c_1 \in X_{cl}, c_2 \in X_{cl}$ тоді й тільки тоді, коли $I \models c_1$ є підкласом $I \models c_2$.

Зберігається ієрархія об'єктних властивостей класів онтології:

$I \models r_{ier_prop}(r_1, r_2), r_1 \in \{ r_i \}, r_2 \in \{ r_i \}$ тоді й тільки тоді, коли $I \models r_1$ є підмножиною $I \models r_2$;

$I \models r_{ier_prop}(r_1, \text{topObjectProperty}), r_1 \in \{ r_i \}$ тоді й тільки тоді, коли $I \models r_1$ є підмножиною $I \models$ topObjectProperty.

Зберігається ієрархія властивостей даних класів онтології:

$I \models p_{ier_prop}(p_1, p_2), p_1 \in \{ p_i \}, p_2 \in \{ p_i \}$ тоді й тільки тоді, коли $I \models p_1$ є підмножиною $I \models p_2$;

$I \models p_{ier_prop}(p_1, \text{topDataProperty}), p_1 \in \{ p_i \}$ тоді й тільки тоді, коли $I \models p_1$ є підмножиною $I \models$ topDataProperty.

Підтримується семантика еквівалентності класів онтології:

$I \models f_{eq}(c_1, c_2), c_1 \in X_{cl}, c_2 \in X_{cl}, f_{eq} \in F_{cl}$ тоді й тільки тоді, коли $I \models c_1$ дорівнює $I \models c_2$.

Підтримується семантика відсутності перетину класів онтології:

$I \models f_{\text{disjoint}}(c_1, c_2), c_1 \in X_{cl}, c_2 \in X_{cl}, f_{\text{disjoint}} \in F_{cl}$ тоді й тільки тоді, коли $I \models c_1$ не перетинається з $I \models c_2$.

Підтримується семантика симетричності об'єктних властивостей екземплярів класів онтології:

$I \models f_{\text{simmetr}}(r_1(x_1, x_2)), x_1 \in X_{ind}, x_1 \in X_{ind}, r_1 \in \{r_i\}, r_{\text{simmetr}} \in F_{prop}$ тоді й тільки тоді, коли $I \models r_1(x_1, x_2)$ співпадає з $I \models r_1(x_2, x_1)$.

Аналогічно підтримується семантика транзитивності, рефлексивності, антирефлексивності тощо об'єктних властивостей екземплярів класів онтології.

Онтологію можна розглядати як множину припустимих тверджень, побудованих з елементів формальної моделі. Інтерпретації, що не суперечать наведеним вище умовам для всіх тверджень, що входять до цієї множини, становлять можливі інтерпретації онтології: $\forall o \in O, I \models o$. Такі інтерпретації називають моделями онтології.

Виразна здатність різних формальних моделей онтологій суттєво різниться та залежить від того, які саме характеристики входять до складу $F = \{F_{cl} \cup F_{prop}\}$. Для реалізації цих моделей є мови подання онтологій, які теж різняться за своїми виразними можливостями та за своєю складністю: RDF Schemas пропонує найпростіший рівень для подання онтологій, а OWL Full — найскладніший. Слід зазначити, що чим вище виразні можливості мови, тим довше та складніше обробляти онтології, побудовані на її основі. Тому вибір засобу подання онтології залежить від специфіки завдань, для розв'язання яких вона розробляється.

Для того, щоб побудувати онтологію, потрібно визначити джерела, з яких можна здобути пертинентні знання, та розробити алгоритми, що забезпечують процес цього здобуття. Зважаючи на те, що для автоматизованого оброблення значно краще придатні структуровані дані, а для здобуття знань найбільш ефективним джерелом є семантична розмітка, розглянемо це на прикладі поповнення онтології ПрО відомостями із семантично розмічених Wiki-сторінок [13].

ПОПОВНЕННЯ ФОРМАЛЬНИХ ОНТОЛОГІЙ ПРЕДМЕТНИХ ОБЛАСТЕЙ ІЗ СЕМАНТИЧНИХ WIKI-РЕСУРСІВ

Для оновлення розробленої онтології та її розширення у разі динамічної зміни інформації про інформаційний об'єкт запропоновано метод поповнення формальних онтологій ПрО із семантичних Wiki-ресурсів (рис. 1), який об'єднує декілька етапів.

Eman 1. Створити першу версію онтології та зберегти її. Слід зазначити, якщо Wiki-ресурс уже має семантичну розмітку, яка за ПрО є близькою до онтології, що будується, то у цій онтології доцільно застосовувати визначені імена для класів, властивостей та інших елементів розмітки. Можна додавати специфічні для ПрО терміни в якості тегів розмітки.

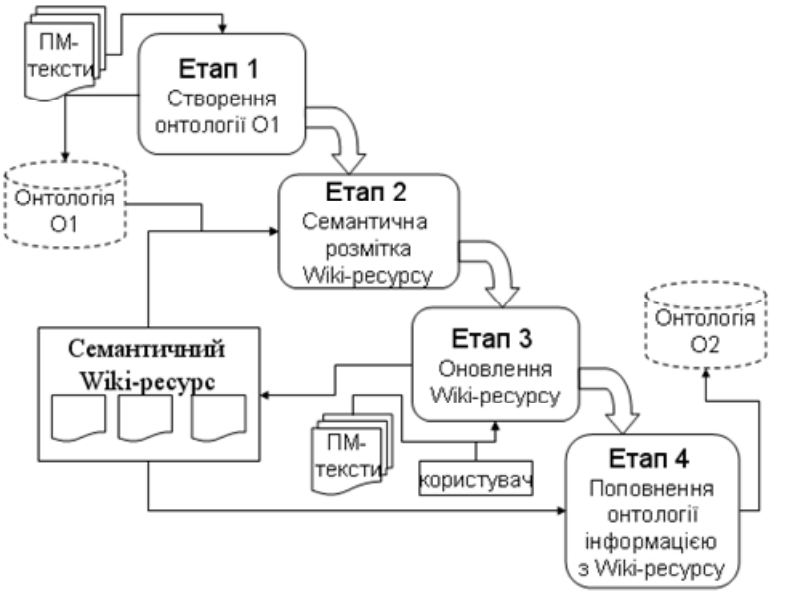

Рис. 1. Метод поповнення онтології

Наприклад, для Wiki-сайту наукового інституту ми можемо застосовувати загальновживані терміни: «Прізвище», «Ім'я», «Посада», «Назва відділу», «Публікація» та «Кількість авторів», але також додати власні терміни «Програмна платформа» та «Мета застосування агентів». Власні теги дозволять відмітити ті відомості, які належать лише онтології ПрО.

Етап 2. Розмітити семантичний Wiki-ресурс, тобто такий ресурс, який підтримує додання семантичної розмітки всіма користувачами термінами цієї онтології.

Етап 3. Дочекатися, коли у розмічені нами сторінки хтось внесе зміни — наприклад, додасть новий проект, змінить посаду тощо. Дізнатися про це ми не можемо, і тому будемо генерувати оновлення з певними інтервалами часу для перевірки.

Етап 4. Викликати оновлення зазначеної онтології, використовуючи тільки ті сторінки Wiki-ресурсу, які містять теги з цієї онтології. Відбір таких сторінок легко здійснити засобами Wiki-системи.

Розглянемо детальніше запропонований вище метод на прикладі задачі поповнення та вдосконалення онтології, призначеної для перетворення природномовного тексту з обмеженою лексикою в жестову мову.

РОЗРОБЛЕННЯ ОНТОЛОГІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ РОЗПІЗНАВАННЯ ТЕКСТУ ДЛЯ ЛЮДЕЙ З ВАДАМИ МОВЛЕННЯ ТА СЛУХУ

Актуальною проблемою є необхідність отримання інформації у вигляді мови жестів для людей з порушеннями мовлення та слуху. У багатьох країнах існує значний прошарок таких людей, яких потрібно активно інтегрувати у суспільство, забезпечити їх роботою, навчати. На сьогодні в Україні проживає близько 500 тисяч людей з порушеннями слуху. Для цієї категорії громадян налічу-

ється 59 спеціалізованих шкіл, 20 університетів. Є навчальні матеріали, доступні для людей з вадами мовлення та слуху (відеословники, програмне забезпечення для навчання, он-лайн курси тощо). Однак, немає ефективних засобів для автоматизованого машинного перекладу на мову та з мови жестів.

Розвиток інформаційних технологій для перекладу на жестову мову є актуальним завданням. Такая інформаційна технологія може мати великий соціальний попит, зокрема, це забезпечить людей з вадами слуху можливістю активно спілкуватися з людьми, які не володіють мовою жестів, розширити сферу спілкування і занять [14–15].

Мова жестів — це мова, яка базується на комбінації жестів. Кожен жест виконується однією або обома руками в поєднанні з мімікою та положенням тіла. Жестова мова є незалежною візуально-просторовою мовою та має свою власну граматику, яка відрізняється від граматики природної розмовної мови. Деякі функції жестової мови дозволяють паралельно переносити інформацію, виконуючи знаки обома руками, використовуючи міміку та артикуляції. В природній розмовній мові це неможливо, де передача інформації є лінійною (слово за словом).

Спільно з кафедрою прикладної математики Варшавського університету виконується соціальний проект створення інтелектуальної інформаційної системи перетворення тексту певної природної мови у жестову мову для людей з вадами мовлення та слуху, який має за мету розпізнавання природомовного тексту на основі онтології, яка допомагає ураховувати всі особливості узгодження жестової мови та природної мови [16–17]. Передбачено створення універсального проекту для багатьох європейських мов.

Для перетворення тексту у мову жестів як область інтерпретації треба одержувати відомості про синоніми, омоніми тощо різних термінів з енциклопедичних Wiki-ресурсів, що містять семантичну розмітку.

Серед завдань цього проекту — створення інтелектуальної інформаційної технології для перекладу тексту української (польської) мови у мову жестів для глухонімих людей на основі онтології, яка надає модель знань про певну предметну область. Передбачається, що літературна текстова українська (польська) мова повинна бути заздалегідь приведена до так званої контрольованої мови, тобто до подання (розбиття) складних речень через набір простих (типу — об'єкт, суб'єкт, предикат). Система повинна надати у відповідність словам контрольованої мови конкретний жест з бази даних жестів за відповідним алгоритмом (рис.2). За цих умов можливі ситуації, які потребують подальшого вирішення.

1. Є *власні імена*, які не подано жестами (наприклад, власні імена людей, географічні назви тощо). Ці імена потрібно подати за допомоги спеціального застосунку в жестову анімацію букв пальцями рук.

2. Є *фрази або речення*, які можна замінити одним жестом. Їх повинна розпізнати онтологічна інтелектуальна система.

3. Є *омоніми*, які також повинна розпізнати інтелектуальна система, наприклад, слово «коса» може мати три різних семантичних значення.

4. Є *синоніми*, які також повинна розпізнати інтелектуальна система, наприклад, ЕОМ, комп'ютер, ноутбук, мейнфрейм. Вони означають одне й те саме (відношення синонімії).

Рис. 2. Алгоритм оброблення омонімії в процесі перетворення природно-мовного тексту на жестову мову

Після оброблення (контролю) тексту інтелектуальною системою виконується послідовна інтеграція цих різнорідних компонент, їх розмітка для подальшого подання жестовою мовою.

Для удосконалення роботи інтелектуальної системи потрібно застосувати алгоритми машинного навчання, які забезпечують адаптацію системи до різних ситуацій лексичного оброблення тексту.

Зазначені інструменти можуть бути використані для розроблення системи машинного перекладу з мови розмовної в жестову і навпаки, щоб полегшити спілкування людям з вадами мовлення та слуху з тими, хто не володіє жестовою мовою.

У розробленні цього проекту вирішується низка завдань:

1) складання специфікації завдань для розроблення інтелектуальної системи розпізнавання проекту та розроблення архітектури системи;

2) розроблення специфікації завдань для філологів української (польської) мови для наповнення бази даних з розпізнавання тексту (список синонімів, антонімів, дієслово = іменник, екземплярів власних назв, груп словосполучень для одного жесту, слів, які не мають жесту, тощо);

3) розроблення концепції функціонування системи розпізнавання з урахуванням можливостей методів машинного навчання (на основі правил SWRL з використанням вхідних тестових наборів — наприклад, перетин тезаурусів семантичної оболонки для одного терміну);

4) розроблення онтологічної моделі розпізнавання тексту для виявлення в ньому неоднозначностей, багатозначностей та розмітки цього ткесту для перетворення в систему жестів;

5) розроблення методики та алгоритмів поповнення формальних онтологій розпізнавання на основі відкритих інформаційних ресурсів (Wiki-ресурсів тощо);

6) розроблення завершальних алгоритмів для програмування платформи інтелектуальної системи розпізнавання тексту та тестування цієї платформи.

Розглянуті формальні моделі онтологій та методи дозволять автоматично оновлювати версії онтологій на основі нових відомостей з відкритих ресурсів. Особливо важливим є те, що запропонованим методом значно легше розширювати словник та будувати його спеціалізовані версії для різних професійних сфер або ПрО. Використання зовнішніх баз даних забезпечує більшу повноту та зв'язність побудованого словника. Нові слова з ПрО додають автоматично, що є особливо важливим для тих нових галузей, які швидко змінюються та розвиваються, наприклад для ІТ. А саме в цій сфері працює велика кількість осіб вказаної групи. Таким чином, запропонований підхід забезпечить покращення якості життя для багатьох людей, спростивши їм спілкування у розширеній сфері. Крім того, такі системи мають велике значення у сфері освіти, для навчання людей з вадами мовлення та слуху релевантним для них спеціальностям, що має подальші перспективи розвитку цього напряму.

Інтегрована програмна технологія побудови індексів бази контекстів омонімів різних типів (функціональних, лексичних) включає модулі створення й ведення індексу омонімів, модуль узгодження індексної бази з основним лінгвістичним ресурсом — граматичним словником, а механізми виконання зовнішніх запитів дозволяють пошук типових омонімічних контекстів у текстовому корпусі на основі індексу омонімів. Всі перераховані завдання вирішуються у разі взаємодії підсистем за спеціальними запитами. База контекстів омонімів є динамічним зовнішнім ресурсом, нарощуваним в наслідок функціонування системи.

Технологія дозволу багатозначності є комплексною технологією, яка поєднує три розроблені програмні технології. Перша технологія — технологія дозволу функціональної омонімії на основі контекстних правил. Метод дозволу багатозначності на основі контекстних правил вирішує функціональну (граматичну) омонімію на основі контекстних правил, які формулюються як результат ретельної лінгвістичної експертизи поводження омоніма в сучасних мовах.

Семантично розмічені сторінки можна отримати з довільного зовнішнього семантичного Wiki-ресурсу, який є релевантним предметній області аналізу. Наприклад, це може бути сторінка енциклопедії, що відповідає терміну, який має омоніми, або ж відповідна сторінка Вікіпедії.

Використання саме семантично розмічених ресурсів має низку переваг.

- Можливість використовувати для аналізу не тільки категорії та зв'язки між сторінками, але й семантичні властивості цих зв'язків (наприклад, враховувати контент тільки тих сторінок, які пов'язані з вибраною сторінкою відношенням «складається з» або «є засобом для»).

- Можливість явно визначити, які саме зв'язки потрібно використовувати:

{{#ask:[[Категорія:ВУЕ]]
[[Категорія:Інструменти]]
[[має приклади::{{PAGENAME}}]]
| format=ul
|limit=100
}}.

- Побудова семантичних запитів для терміну, що буде автоматизовано інтегрувати всі відомості про термін на одну сторінку.

{{#ask:[[Категорія:ВУЕ]] [[Коса]]
| format=ul
|limit=20
}}

На основі семантичної розмітки зі сторінок отримуються назви термінів: виділяються посилання та семантичні посилання на інформаційні об'єкти типу «Сторінка». Наприклад:

*..."'[[Ім'я::Альберт Петров]]'", бл. [[Рік народження::1885]], [[**місце народження**: **Біла коса**]], реформатор собаководства, природознавець, філософ,...*

Для виконання завдань аналізу відношень між словами та поняттями онтології слугують так звані лексичні та лексико-семантичні бази даних або структуровані лексикони. До таких систем належать Прінстонський WordNet, MindNet, програмний продукт проекту дослідницького відділу Майкрософт, FrameNet, розроблений в університеті Берклі, VerbNet, HowNet, ConceptNet, словник української мови СУМ-11, словник Грінченка тощо. Усі сучасні лінгвістичні ресурси допомагають встановлювати значення омонімів, полісемантичних слів, виявляти синоніми, розробляти нові та оновлювати вже створені онтології чи тезауруси, автоматизовано підсумовувати тексти, розширювати можливості пошукових систем тощо [18–19]. Кожна з баз даних має як переваги, так і свої обмеження для розв'язання прикладних завдань. Серед вказаних ресурсів WordNet набув широкого застосування як найнеобхідніший словник і найуніверсальніший інструмент у галузі комп'ютерної лінгвістики. Словник СУМ-11 має сьогодні таке ж значення для української мови і сприяє сфері опрацювання природно-мовних ресурсів та лінгвістики загалом, адже тезаурус такого типу є також надійним джерелом інформації про конкретну мову.

ВЛАСТИВОСТІ ПОБУДОВАНОЇ ОНТОЛОГІЇ

Розроблена онтологія з омонімії певної мови (рис. 2):

$$O_{df} = \langle X, R, 0, 0 \rangle,$$

де із формальної моделі $O = \langle X, R, F, T \rangle$ для потреб нашого проекту взято тільки терміни та відношення між ними, F та T відсутні, дозволяє визначити відношення ієрархії та синонімії між термінами, а за контекстом встановлювати омонім, який трапляється у тексті.

Запропонована онтологія відповідає дескриптивній логіці SHOIQ (тобто SHIQ з номіналами, які дають змогу здійснювати описи класів у вигляді переліку об'єктів), що є розширенням ALC і, відповідно до описаної вище формальної моделі та її інтерпретації, може бути надана мовою OWL DL, що гарантує скінченність процесу оброблення цієї структури знань [20].

ВИСНОВОК

Дослідження математичних моделей інтелектуальних систем, які використовують онтології та моделі завдань, дають змогу визначити їхні обмеження, розвязувати завдання валідації та верифікації систем онтологічних моделей. Розроблені в роботі методи застосовано для побудови бази знань прикладних інтелектуальних систем з можливістю її динамічного поповнення.

Запропонований метод поповнення формальних онтологій предметних областей із семантичних Wiki-ресурсів забезпечує розширення словника та побудову його спеціалізованих версій для різних професійних сфер або предметних областей з використанням зовнішніх баз даних. Автоматичне додання нових слів з предметних областей є особливо важливим для тих нових галузей, які швидко змінюються та розвиваються, особливо для галузі інформаційних технологій, в якій працює велика кількість осіб з вадами мовлення та слуху. Запропонований підхід забезпечить покращення якості життя для багатьох людей, розширюючи межи їх спілкування.

Застосування інтероперабельного подання знань у вигляді онтологій та відповідних технологій і форматів дає змогу інтегрувати мультилігвістичну систему зі знаннями, наданими в Semantic Web. Розвитком запропонованого методу має стати створення глобальної семантичної мультилінгвістичної інформаційної системи для перетворення тексту на основних європейських мовах в жестову мову для людей з вадами мовлення та слуху як важливий соціальний проект.

ЛІТЕРАТУРА

1. Gruber, T.R. A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge Acquisition*. 1993. Vol 5. P. 199–220.
2. Poli R. Decriptive, Formal and Formalized Ontology. In: Husserl's Logical Investigations reconsidered, by Denis Fisette (ed.). Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2003, 24p. — https://www.ontology.co/essays/descriptive-ontologies.pdf
3. Degen W., Heller B., Herre H., Smith B. *GOL: A General Ontological Language*, 2002, 63p. https://www.researchgate.net/publication/2498727_GOL_A_General_Ontological_Language
4. Genesereth V.R., Fikes R.E. Knowledge Interchange Format, Version 3.0, Reference Manual. Logic Group Report Logic-92-1, Computer Science Department, Stanford University. 1992. 68p. —https://pdfs.semanticscholar.org/b20c/866025b85f165557235a68143c42d53fa70f.pdf
5. Guarino N. Formal Ontology and Information Systems. In: Formal Ontology in Information Systems. Proceedings of FOIS'98, by N. Guarino (ed.). Trento. Italy, Amsterdam, IOS-Press. 1998. P. 3–15 https://klevas.mif.vu.lt/~donatas/Vadovavimas/Temos/OntologiskaiTeisingasKoncepcinisModeliavimas/papildoma/Guarino98-Formal%20Ontology%20and%20Information%20Systems.pdf
6. Васюков В.Л. *Формальная онтология и искусственный интеллект.* М.: ИФ РАН, 2006. — 140 с.
7. Рогушина Ю.В., Гладун А.Я. Мереологические аспекты онтологического анализа интеллектуальных Web-сервисов. *Збірник праць VII Міжнародної конференції «Інтелектуальний аналіз інформації» ІАІ-2007, 12-14 травня 2007, Київ*. С. 312–321.

8. Kotarbiński T. *Elementy teorji poznania, logiki formalnej i metodologji nauk*. Lwow, 1929. — 232p.
9. Wille R., Ganter B. *Formale Begriffsanalyse*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1996, 192 p.
10. Ganter B., Stumme G., Wille R., eds. Formal Concept Analysis: Foundation and Application. *Lecture Notes in Artificial Intelligence*. 2005, No. 3626. 349p. — https://link.springer.com/content/pdf/bfm%3A978-3-540-31881-1%2F1.pdf
11. Lammari N., Metais E. Building and maintaining ontologies: a set of algorithms. *Data Knowledge Engineering*, 2004, No. 48 (2), P 155–176.
12. Guarino N. Formal Ontology and Information Systems. In: Ontology in Information Systems. Proceedings of FOIS-08, Trento. Italy, by N. Guarino (ed.), Amsterdam, IOS-Press, 2009. 340 p. http://mba.eci.ufmg.br/downloads/recol/FormalOntologyinInformationSystems2008.pdf
13. Рогушина Ю.В., Прийма С.М., Строкань О.В. *Створення та використання семантичних Wiki-ресурсів: навчальний довідник*. Мелітополь: ФОП Однорог Т.В., 2017. 169 с.
14. Анисимов А.В., Лиман К.С., Марченко А.А. Методы вычисления мер семантической близости слов естественного языка. *Штучний інтелект*, 2009, №3. С. 612–617. http://www.nbuv.gov.ua/portal/natural/ii/2010_3/AI_2010_3%5C3%5C00_AnisimovLiman_Marchenko.pdf
15. Lozynska O., Davydov M. Information technology for Ukrainian Sign Language translation based on ontologies. *An International quarterly journal* ECONTECHMOD, 2015, Vol. 04, No. 2, P. 13–18.
16. Гладун А.Я. Хала К.О *Стандарт ДСТУ ISO/IEC 2382:2018 Інформаційні технології. Словник*. Київ: УкрНДНЦ, 2018. 526 с.
17. Anisimov A., Marchenko O., Taranukha V., Vozniuk T. Semantic and Syntactic Model of Natural Language Based on Non-negative Matrix and Tensor Factorization. In: Proceedings of the International Conference on Natural Language Processing, 2014, Springer, Cham. P.177–184.
18. Гладун А.Я., Рогушина Ю.В. Репозиторий онтологий как средство повторного использования знаний для распознавания информационных объектов. *Онтология проектирования,* №1, 2013. С. 35–49.
19. Гладун А.Я., Рогушина Ю.В. *Семантичні технології: принципи та практики*. К: Універсаріум, 2016. 314с.
20. Гладун А.Я., Рогушина Ю.В. Основи методології формування тезаурусів з використанням онтологічного та мереологічного аналізу. *Искусственный интеллект*, 2008, №5. С. 112–124.

Отримано 03.04.2018

REFERENCES

1. Gruber, T.R. A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge Acquisition*. 1993. Vol 5. P. 199–220.
2. Poli R. Decriptive, Formal and Formalized Ontology. In: Husserl's Logical Investigations reconsidered, by Denis Fisette (ed.). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003, pp. 183–210. 24p. — https://www.ontology.co/essays/descriptive-ontologies.pdf
3. Degen W., Heller B., Herre H., Smith B. *GOL: A General Ontological Language*. 2002, 63 p. https://www.researchgate.net/publication/2498727_GOL_A_General_Ontological_Language
4. Genesereth V.R., Fikes R.E. Knowledge Interchange Format, Version 3.0, Reference Manual. Logic Group Report Logic-92-1, Computer Science Department, Stanford University. 1992. 68p. — https://pdfs.semanticscholar.org/b20c/866025b85f165557235a68143c42d53fa70f.pdf
5. Guarino N. Formal Ontology and Information Systems. In: Formal Ontology in Information Systems. Proceedings of FOIS'98, by N. Guarino (ed.). Trento. Italy, Amsterdam, IOS-Press. 1998. P. 3–15 https://klevas.mif.vu.lt/~donatas/Vadovavimas/Temos/OntologiskaiTeisingasKoncepcinisModeliavimas/papildoma/Guarino98-Formal%20Ontology%20and%20Information%20Systems.pdf
6. Vasyukov V.L. Formal ontology and artificial intelligence (monograph). Moscow: IF RAS, 2006. 140 p. (in Russian)

7. Rogushina Yu.V., Gladun A.Ya. Mereological aspects of the ontological analysis of intelligent Web-services. *Proceedings of the VII International Conference "Intellectual Analysis of Information" IAI-2007*, *12-14 Mai 2007,* Kyiv. — P. 312–321. (in Russian)
8. Kotarbiński T. Elements of the theory of cognition, formal logic and methodology of sciences. Lviv, 1929. 232p.
9. Wille R., Ganter B. *Formale Begriffsanalyse*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1996, 192 p.
10. Ganter B., Stumme G., Wille R., eds. Formal Concept Analysis: Foundation and Application. *Lecture Notes in Artificial Intelligence*. 2005, No. 3626. 349 p. — https://link.springer.com/content/pdf/bfm%3A978-3-540-31881-1%2F1.pdf
11. Lammari N., Metais E. Building and maintaining ontologies: a set of algorithms. *Data Knowledge Engineering*, 2004, No. 48 (2), P 155–176.
12. Guarino N. Formal Ontology and Information Systems. In: Ontology in Information Systems. Proceedings of FOIS-08, Trento. Italy, by N. Guarino (ed.), Amsterdam, IOS-Press, 2009. 340 p. http://mba.eci.ufmg.br/downloads/recol/FormalOntologyinInformationSystems2008.pdf
13. Rogushina Yu.V., Priyma S.M, Strokan O.V. Creating and using semantic Wiki-resources: tutorial. Melitopol, FOP Odnorog T.V., 2017. 169 p. (in Ukrainian).
14. Anisimov A.V., Lyman K.S., Marchenko A.A. Methods for computing measures of semantic proximity of natural language words. *Artificial Intelligence*, 2009, № 3. P. 612–617. (in Russian)
15. Lozynska O., Davydov M. Information technology for Ukrainian Sign Language translation based on ontologies. *An International quarterly journal* ECONTECHMOD, 2015, Vol. 04, No. 2, P. 13–18.
16. Gladun A.Ya. Khala K.O. Standard DSTU ISO/IEC 2382:2018 Information Technologies. Dictionary. Kyiv: UkrNDNC, 2018. 526 p. (in Ukrainian).
17. Anisimov A., Marchenko O., Taranukha V., Vozniuk T. Semantic and Syntactic Model of Natural Language Based on Non-negative Matrix and Tensor Factorization. *Proceedings of the International Conference on Natural Language Processing*, 2014, Springer, Cham. P. 177–184.
18. Gladun A.Ya., Rogushina Yu.V. Ontology Repository as a Tool for Reusing Knowledge for Recognizing Information Objects. *Ontology of Design*, No 1, 2013. P. 35–49. (in Russian).
19. Gladun A.Ya., Rogushina Yu.V. *Semantic Technologies: Principles and Practices*. Kyiv: Universarium, 2016. 387 p. (in Ukrainian).
20. Gladun A.Ya., Rogushina Yu.V. Bases of Methodology of Formation of Thesauruses with Use Ontologic and the Mereologic Analysis. *Artificial Intelligence*, 2008, № 5. P. 112–124. (in Ukrainian).

Received 03.04.2018

В.И. Грищенко[1], член-корр. НАН Украины,
директор Международного научно-учебного центра
информационных технологий
НАН Украины и МОН Украины
e-mail: vig@irtc.org.ua
А.Я. Гладун[1]**,** канд.техн.наук,
старш. науч. сотр., отд. комплексных исследований
информационных технологий и систем
e-mail: glanat@yahoo.com
Ю.В. Рогушина[2]**,** канд.физ.-мат. наук, старш. наук. сотр.,
отд. автоматизированных информационных систем
ladanandraka2010@gmail.com
[1] Международный научно-учебный центр информационных
технологий и систем НАН Украины и МОН Украины,
пр. Академика Глушкова, 40, г. Киев, 03187, Украина
[2] Институт программных систем НАН Украины,
пр. Академика Глушкова, 40, г. Киев, 03187, Украина

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕМАНТИЧЕСКИХ WIKI-РЕСУРСОВ КАК ИСТОЧНИКА ЗНАНИЙ ДЛЯ ПОПОЛНЕНИЯ ФОРМАЛЬНЫХ ОНТОЛОГИЙ ПРЕДМЕТНЫХ ОБЛАСТЕЙ

Рассмотрена целесообразность применения онтологий для представления знаний в системах искусственного интеллекта, ориентированных на функционирование в открытой среде Web. Проанализированы исследования, связанные с построением формальных онтологий предметных областей, и средства их формализации. Предложена формальная модель онтологии, которая уточняет существующие подходы, более детально описывая свойства и характеристики отношений между основными элементами онтологии. Предложено использование такой модели как основы для сопоставления онтологии с дескриптивными логиками.

В работе представлен метод пополнения онтологии предметной области, который базируется на предложенной модели и использовании семантически размеченных Wiki-ресурсов как источника знаний, что обеспечивает динамическое пополнение базы знаний прикладных интеллектуальных систем. Приведен пример использования предложенного метода в задаче преобразования естественноязыкового текста в язык жестов в системе информационной поддержки лиц с недостатками речи и слуха.

Ключевые слова: *формальная онтология, онтологические языки, формальная модель онтологии, интерпретация онтологий, семантические Wiki-ресурсы, информационная система.*

V.I. Gritsenko[1], Corresponding Member of NAS of Ukraine,
Director of International Research and Training
Center for Information Technologies and Systems
of the National Academy of Sciences of Ukraine
and Ministry of Education and Science of Ukraine
e-mail: vig@irtc.org.ua
A. Ya. Gladun[1], PhD **(**Engineering**),**
Senior Researcher of the Department of Complex Research
of Information Technologies and Systems
email: glanat@yahoo.com
Yu. V. Rogushina[2]**,** PhD **(**Phys&Math)
Senior Researcher of the Department of Automated Information Systems
email: ladanandraka2010@gmail.com
[1] International Research and Training
Center for Information Technologies and Systems
of the National Academy of Sciences of Ukraine
and Ministry of Education and Science of Ukraine
40, Acad. Glushkov av., 03187, Kiev, Ukraine
[2] Institute of Program Systems
of the National Academy of Sciences of Ukraine,
40, Acad. Glushkov av., 03187, Kiev, Ukraine

MODELS AND METHODS OF THE SEMANTIC WIKI RESOURCES USE AS KNOWLEDGE SOURCES FOR RENEWAL OF FORMAL DOMEN ONTOLOGIES

Introduction. The construction and implementation of intelligent systems based on the formalization and reuse of knowledge is a promising direction for the practical application of artificial intelligence methods. The basis of such systems is formalized representations of knowledge about the subject area, for example, in the form of ontology. There remains an open question of the choice of the formal apparatus tools for the construction of ontology.

The purpose of the paper is to develop models of structured representation of knowledge in Wiki-resources on the basis of ontologies and methods of their application for improving and replenishing ontologies of the subject area. The offered approach will allow integrating the current information on changes in the subject area and creating actual ontologies for various applied information technologies using ontologies.

Results. The expediency of using ontologies for presentation of knowledge in systems of artificial intelligence oriented to functioning in the open environment of the Web is considered. The researches connected with the construction of formal ontologies of subject areas and the means of their formalization are analyzed. A formal model of ontology, which specifies the existing approaches, describing in more detail the properties and characteristics of the relations between the main elements of ontology is proposed. An example of using the proposed method in the task of transforming the natural text into a sign language in the system of information support of people with speech and hearing impairments is given.

Conclusions. The paper describes a method for renewal the ontology of a subject area based on the proposed model and the use of semantically-tagged Wiki-resources as a source of knowledge. This provides a dynamic replenishment of the knowledge base of applied intelligent systems. The proposed method of renewal formal ontologies of the subject domain from semantic Wiki-resources provides the expansion of the vocabulary and the construction of its specialized versions for various professional fields or subject areas using external databases. The automatic addition of new words from subject areas is particularly important for developing industries, especially for the IT sector, which has a large number of people with speech and hearing impairments. The proposed approach will improve the quality of life for many people, expanding the boundaries of their communication.

Keywords: *formal ontology, ontological languages, formal model of ontology, interpretation of ontologies, semantic Wiki-resources, information system.*

Интеллектуальное управление и системы

DOI: https://doi.org/10.15407/kvt192.02.044

UDC 681.5

L.S. ZHITECKII, PhD (Engineering),
Acting Head of the Department of Intelligent Automatic Systems
e-mail: leonid_zhiteckii@i.ua
K.Yu. SOLOVCHUK, PhD Student
e-mail: solovchuk_ok@ukr.net
International Research and Training Center for Information Technologies
and Systems of the National Academy of Science of Ukraine
and Ministry of Education and Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine,
Acad. Glushkova av., 40, Kiev, 03187, Ukraine

ADAPTIVE STABILIZATION OF SOME MULTIVARIABLE SYSTEMS WITH NONSQUARE GAIN MATRICES OF FULL RANK

Introduction. *The paper states and solves a new problem concerning the adaptive stabilization of a specific class of linear multivariable discrete-time memoryless systems with nonsquare gain matrices at their equilibrium states. This class includes the multivariable systems in which the number of outputs exceeds the number of control inputs. It is assumed that the unknown gain matrices have full rank.*

The purpose *of this paper is to answer the question of how the pseudoinverse model-based adaptive approach might be utilized to deal with the uncertain multivariable memoryless system if the number of control inputs is less than the number of outputs.*

Results. *It is shown that the parameter estimates generated by the standard adaptive projection recursive procedure converge always to some finite values for any initial values of system's parameters. Based on these ultimate features, it is proved that the adaptive pseudoinverse model-based control law makes it possible to achieve the equilibrium state of the nonsquare system to be controlled. The asymptotical properties of the adaptive feedback control system derived theoretically are substantiated by a simulation experiment.*

Conclusion. *It is established that the ultimate behavior of the closed-loop control system utilizing the adaptive pseudoinverse model-based concept is satisfactory.*

Keywords: *adaptive control*, *multivariable system, discrete time, feedback, pseudoinversion, stability, uncertainty*.

© L.S. ZHITECKII, K.Yu. SOLOVCHUK, 2018

INTRODUCTION

A long-standing problem of the optimal controller design for multivariable systems has been solved by using different approaches including the l_1 optimal control approach [1, 2]. It remains the important problem in the modern control theory [3–5].

Based on the well-known internal model principle, multivariable control problem was first approached in the paper [6]. Within the framework of this principle, the so-called inverse model approach seems to be perspective to deal with improving MIMO (multi-input multi-output) feedback controls. Since the pioneering work [7], the problem of inversion of linear time-invariant MIMO systems has attracted an attention of several researches; see, e.g. [8–10]. Last time, a significant progress in this scientific area has been achieved in [11–14].

The inverse model approach to ensuring perfect steady-state regulation of linear discrete-time memoryless multivariable systems was first advanced in [15]. Similar approach has also been discussed in [10] dealing with the problem of minimal inversion. However, the inverse model approach is quite unacceptable if the MIMO systems to be controlled are nonsquare.

It turned out that the so-called pseudoinverse (generalized inverse) model approach first proposed in the paper [9] can be exploited to cope with the noninevitability of nonsquare system. Recently, this approach was extended in [16–19] for controlling a wide class of discrete-time memoryless multivariable systems. In particular, in [16] it was first established that pseudoinverse model-based controller for the steady-state regulation of the MIMO systems having singular or nonsquare gain matrices is indeed optimal. But such controller can be implemented if system parameters are known *a priori*. In the case of the parameter uncertainty, the nonadaptive controller employing a fixed linear pseudoinverse model can be shown to be acceptable to ensure the robust stability of multivariable closed-loop systems containing uncertain linear and some nonlinear memoryless plants [17–19]. Nevertheless, this controller may not be suitable if parameter uncertainty is great enough.

An adaptation of control law is known as some universal concept to deal with uncertain systems. Results obtained within the framework of adaptive controls were summarized in many books [20–27], etc. A key question in these controls concerns the stability of resulting systems, i.e. the boundedness of the control input and output signals [20, 21]. In order to resolve this important question, two different tools were independently advanced in above two books. Namely, the so-called Frequency Theorem was exploited in [20, Theorem 4.17.3] to establish the ultimate boundedness properties of linear adaptive control systems including multivariable plants with square gain matrices, whereas the so-called Key Technical Lemma of [21, item 6.2] was used to derive such properties in MIMO case where the number of outputs does not exceed the number of control inputs, see [21, subitem 6.3.6]. Unfortunately, these tools seems to be not admissible to an adaptive nonsquare case. To the best of author's knowledge, there are no theoretical results concerning adaptive controls of these MIMO systems while they may appear in practice [21, p.141].

The purpose of this paper is to answer the question of how the pseudoinverse model-based adaptive approach might be utilized to deal with the uncertain multivariable memoryless system in which the number of its output exceeds the number of control inputs.

PROBLEM STATEMENT

Let

$$y_n = Bu_{n-1} \tag{1}$$

be the difference equation of an static (memoryless) plant that is some MIMO discrete-time system to be stabilized. In this equation, $y_n = [y_n^{(1)},...,y_n^{(m)}]^T$ and $u_n = [u_n^{(1)},...,u_n^{(r)}]^T$ are its m-dimensional output and r-dimensional control input vectors, respectively, at the nth time instant $(n = 1, 2, \ldots)$, and

$$B = \begin{pmatrix} b^{(11)} & \ldots & b^{(1r)} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ b^{(m1)} & \ldots & b^{(mr)} \end{pmatrix} \tag{2}$$

denotes the time-invariant $m \times r$ gain matrix.

Consider a nonsquare system, where

$$r < m, \tag{3}$$

i.e., where the number of output variables $y_n^{(i)}$ $(1 \le i \le m)$ exceeds the number of control variables $u_n^{(j)}$ $(1 \le j \le r)$.

Suppose that B is some unknown matrix of full rank meaning that $\operatorname{rank} B = \min\{r, m\}$. Due to (3) we have

$$\operatorname{rank} B = r. \tag{4}$$

Introducing the vector $y^0 = [y^{0(1)},...,y^{0(m)}]^T$ whose components are the desired output variables (the given set-points for outputs), define the current ith output error $e_n^{(i)}$ as

$$e_n^{(i)} = y^{0(i)} - y_n^{(i)}, \quad i = 1, \ldots, m. \tag{5}$$

Then the output error vector will be given by

$$e_n = y^0 - y_n. \tag{6}$$

It is assumed that the elements $b^{(ij)}$ $(i = 1, \ldots, m, j = 1, \ldots, r)$ of B in (2) are unknown *a priori*. Moreover, the bounds on these elements are assumed to be unknown (contrary to [18, 19]) and it is essential.

The problem stated below is as follows. Based on the available observations of $e_n, e_{n-1}, \ldots, e_0$ given by (6), devise an adaptive controller of a general form

$$u_n = U_n(e_n, e_{n-1}, \ldots, e_0), \tag{7}$$

such that the closed-loop control system containing the uncertain plant (1) and the feedback (7) will be stable. More specifically, we require the sequences

$\{u_n\} := u_0, u_1, \ldots$ and $\{y_n\} := y_0, y_1, \ldots$ to be bounded uniformly ($\{u_n\} \in \ell_\infty, \{y_n\} \in \ell_\infty$) and for any initial conditions to achieve

$$u_n \xrightarrow[n\to\infty]{} u^{\mathrm{e}}, \qquad y_n \xrightarrow[n\to\infty]{} y^{\mathrm{e}}, \tag{8}$$

where the pair $(u^{\mathrm{e}}, y^{\mathrm{e}})$ with $y^{\mathrm{e}} = Bu^{\mathrm{e}}$ defines the equilibrium state of the feedback control system (1), (6), (7).

Remark 1. Note that it is not required for the errors $e_n^{(1)}, \ldots, e_n^{(m)}$ given by (5) to be asymptotically equal to zero. In fact, *m* zero errors cannot be achieved simultaneously except a unique case when $y^0 \in \Re(B)$, where $\Re(B)$ denotes the so-called range of B (the definition of $\Re(\cdot)$ can be found in [28, Exercise 2.8.6]). Thus without less of generality we assume that $y^0 \notin \Re(B)$.

ADAPTIVE CONTROLLER DESIGN

Suppose that B is known. Then the pseudoinverse model-based control law of the form

$$u_n = u_{n-1} + B^+ e_n \tag{9}$$

advanced in [16] can here be chosen. In this equation, B^+ specifies the so-called pseudoinverse matrix given by [28, Theorem 3.4]

$$B^+ = \lim_{\delta\to 0} (B^T B + \delta I_r)^{-1} B^T, \tag{10}$$

where I_q denotes the identity $q \times q$ matrix.

Note that under conditions (3), (4) on B, instead of (10), a very simple formula

$$B^+ = (B^T B)^{-1} B^T \tag{11}$$

may be employed to calculate B^+ for given B; see [28, Exercise 3.5.3].

Following to the standard identification approach, we will design an adaptive control by replacing the unknown matrix B in (9) by its suitable estimate B_n updated at the *n*th time instant. Then the control law takes the form

$$u_n = u_{n-1} + B_n^+ e_n, \tag{12}$$

where

$$B_n = \begin{pmatrix} b_n^{(11)} & \ldots & b_n^{(1r)} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ b_n^{(m1)} & \ldots & b_n^{(mr)} \end{pmatrix}. \tag{13}$$

To derive the estimation algorithm for updating B_n, we first define the ith current estimation error $\widetilde{e}_n^{(i)}$ given as follows:

$$\widetilde{e}_n^{(i)} = e_n^{(i)} - e_{n-1}^{(i)} + b_{n-1}^{(i)T}\nabla u_{n-1} \quad (i = 1, \ldots, m). \tag{14}$$

In these expressions, $b_n^{(i)T} = [b_n^{(i1)}, \ldots, b_n^{(ir)}]$ is the ith row of B_n selected from (13), and the notation $\nabla u_n := u_n - u_{n-1}$ is used.

Remark 2. By virtue of (1) together with (8), (5), it follows that if $b_n^{(i)} = b^{(i)}$, where $b^{(i)T} = [b^{(i1)}, \ldots, b^{(ir)}]$ denotes the ith row of B then

$$\widetilde{e}^{(i)} = 0 \tag{15}$$

will be ensured. Based on (15) define a set Γ_n of possible $b^{(i)}$s under which the estimation errors are equal to zero for given observable $e_n^{(i)}, e_{n-1}^{(i)}, \nabla u_{n-1}$. Obviously, Γ_n represents the hyperplane

$$\Gamma_n = \{b^{(i)} : \ e_n^{(i)} - e_{n-1}^{(i)} + b_{n-1}^{(i)T}\nabla u_{n-1} = 0\} \subset \mathbf{R}^r \tag{16}$$

belonging to the r-dimensional Euclidean space $\mathbf{R}^r$. It is not hard to see that $b^{(i)} \in \Gamma_n$ for all $n = 1, 2, \ldots$. □

Now, similar to [21, sect. 3.3], we will choose the adaptation algorithm as the recursive estimation procedure

$$b_n^{(i)} = b_{n-1}^{(i)} + \gamma_n^{(i)} \frac{\widetilde{e}_n^{(i)}}{c_0 + \| \nabla u_{n-1} \|^2} \nabla u_{n-1} \quad (i = 1, \ldots, m), \tag{17}$$

where c_0 is an arbitrary sufficiently small positive constant ($c_0 << 1$) needed to avoid the possibility of division by zero, and $\gamma_n^{(i)}$ is a scalar possibly time-varying multiplier (in contrast to Equation (3.3.19) of [21]) satisfying

$$0 < \underline{\gamma}^{(i)} \le \gamma_n^{(i)} \le \overline{\gamma}^{(i)} < 2. \tag{18}$$

This procedure describes the so-called projection algorithm which is also known in the literature as the normalized least-mean-squares algorithm [21, p. 52].

There is a simple geometrical interpretation of (17), (18) (in terms of orthogonal projection of vector $b_{n-1}^{(i)}$ onto the hyperplane Γ_n represented by (16) if $\gamma_n^{(i)} = 1$ and $c_0 = 0$). It is given in Fig. 1, where admissible $b_n^{(i)}$s for $\gamma_n^{(i)} \in (0, 2)$ are also shown.

Remark 3. In order to do not deal with the possible division by zero, instead of (17), other estimation algorithm

$$b_n^{(i)} = \begin{cases} b_{n-1}^{(i)} & \text{if } \| \nabla u_{n-1} \| = 0 \\ b_{n-1}^{(i)} + \gamma_n^{(i)} \dfrac{\widetilde{e}_n^{(i)}}{\| \nabla u_{n-1} \|^2} \nabla u_{n-1} & \text{otherwise} \end{cases}, \tag{19}$$

can also be proposed as the adaptive estimation procedure. This algorithm represents the slightly modified well known Kaczmarz's algorithm who proposed it in 1937 for solving a set of linear equations (a translation of his original work can be found in the recent paper [29]). □

Thus, the algorithm (17) (or (19)) together with (16), (18) leads to forming the estimate matrix B_n given by (13). It turns out that it is possible to ensure

$$\operatorname{rank} B_n = r \quad \forall n = 1, 2, \ldots \tag{20}$$

by suitable choice of $\gamma_n^{(i)}$s from $[\underline{\gamma}^{(i)}, \overline{\gamma}^{(i)}]$ with arbitrary numbers $i = i_1, \ldots, i_r$ such that $1 \le i_1 < \ldots < i_r \le m$. To substantiate this fact, consider the so-called $r \times r$ submatrix $B_n[i_1, \ldots, i_r \,|\, 1, \ldots, r]$ of B_n consisting of its r rows with the numbers $i_1, \ldots, i_r$ and of all columns (the definition of some submatrix of an arbitrary P and its symbol notation $P[\cdot\,|\,\cdot]$ have been taken from [30, part 1, item 2.2]).

Following to [20, item 4.2.2] it can be shown that if $\gamma_n^{(i)} \in [\gamma', \gamma'']$ then the requirement $\operatorname{rank} B_n[i_1, \ldots, i_r \,|\, 1, \ldots, r] = r$ can always be satisfied because

$$\det B_n[i_1, \ldots, i_r \,|\, 1, \ldots, r] \neq 0$$

may take place at some isolated $\gamma_n^{(i)}$s. Thereby, the condition (20) can be met. This makes it possible to calculate B_n^+ by

$$B_n^+ = (B_n^T B_n)^{-1} B_n^T \tag{21}$$

similarly to (11).

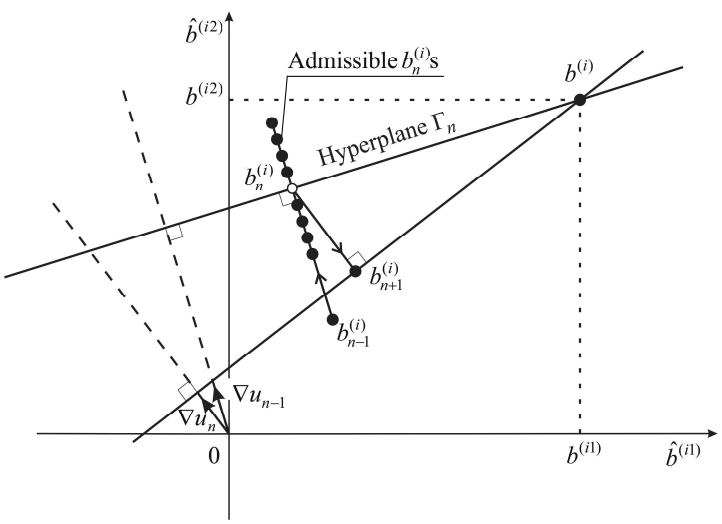

Fig. 1. The algorithm (17), (18) as an orthogonal projection process for the two-dimensional case ($r = 2$)

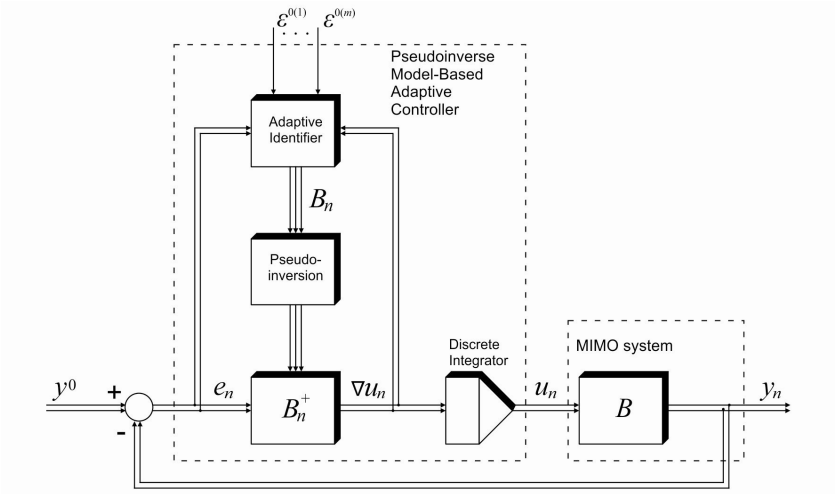

Fig. 2. Configuration of adaptive control system

The choice of $\gamma_n^{(i)}$ completes the synthesis of the adaptive control algorithm determined in the expressions (12), (17) together with (6), (13), (14), (18) and (21) in full detail. To implement this algorithm, the adaptive pseudoinverse model-based control system is designed as shown in Fig. 2.

As it is seen, the controller of this system contains the discrete integrator summing the increments

$$\nabla u_n = B_n^+ e_n \tag{22}$$

from 0 to n at each nth time instant and giving

$$u_n = \sum_{k=0}^{n} \nabla u_k$$

(in accordance with (12)).

ASYMPTOTIC BEHAVIOR OF ADAPTIVE FEEDBACK CONTROL SYSTEM

To study the ultimate behavior of the adaptive control algorithm (12), (17) together with (6), (14), (21), the preliminary results formulated in [21, Lemma 3.3.2] are needed. From these results we can derive the following asymptotic properties:

(i) the scalar variables $V_n^{(i)} := \| b^{(i)} - b_n^{(i)} \|$ are the Lyapunov function of the algorithm (17) meaning

$$V_n^{(i)} \le V_{n-1}^{(i)} \qquad \forall i = 1, \ldots, m;$$

(ii) the sequences $\{b_n^{(i)}\}$ satisfy

$$\| b_n^{(i)} - b_{n-1}^{(i)} \| \to 0 \quad \text{as} \quad n \to \infty \qquad \forall i = 1, \ldots, m;$$

(iii) there exist the limits

$$\lim_{n\to\infty} \frac{\widetilde{e}_n^{(i)}}{(c_0 + \| \nabla u_{n-1} \|^2)^{1/2}} = 0 \qquad \forall i = 1, \ldots, m. \tag{23}$$

With the foregoing properties (i) – (iii), the following lemma can be shown to be valid.

Lemma. *For the algorithm* (17) *together with* (14) *and subject to* (18), *it follows that:*

(a) *the current estimate* B_n *of unknown* B *remains always upper bounded implying*

$$\| B_n \| < \infty \quad \forall n;$$

(b) *the matrix sequence* $\{B_n\}$ *satisfies*

$$\| B_n - B_{n-1} \| \xrightarrow[n\to\infty]{} 0;$$

(c) *the zero limit*

$$\lim_{n\to\infty} \frac{\| \widetilde{e}_n \|}{c_1 + \| \nabla u_{n-1} \|} = 0 \tag{24}$$

is achieved, where $\widetilde{e}_n$ *represents the estimation error vector defined as*

$$\widetilde{e}_n = [\widetilde{e}_n^{(1)}, \ldots, \widetilde{e}_n^{(m)}]^T, \tag{25}$$

and $c_1 = c_0^{1/2}$.

Proof. Part (a) follows from the property (i) and the definition (13) of B_n. Part (b) holds due to the property (ii).

To prove part (c) we can write

$$\lim_{n\to\infty} \frac{\| \widetilde{e}_n \|}{(c_0 + \| \nabla u_{n-1} \|^2)^{1/2}} = 0, \tag{26}$$

using (23) and the definition (25) of $\widetilde{e}_n$. Since $(h_1 + h_2)^{1/2} \le h_1^{1/2} + h_2^{1/2}$ for any numbers $h_1, h_2 \ge 0,$ the inequality

$$\frac{\| \widetilde{e}_n \|}{(c_0 + \| \nabla u_{n-1} \|^2)^{1/2}} \ge \frac{\| \widetilde{e}_n \|}{c_1 + \| \nabla u_{n-1} \|}$$

with $c_1 = c_0^{1/2}$ is valid. Taking this inequality into account, due to (26) we immediately obtain (24). □

Now, we are able to present some basic result as

Theorem. *The adaptation procedure* (17), (14) *has the following ultimate property:*

$$\lim_{n\to\infty} \| \widetilde{e}_n \| = 0. \tag{27}$$

Proof. First, recalling that $e_n = [e_n^{(1)}, \ldots, e_n^{(m)}]^T$, due to (13), (14) we obtain

$$\widetilde{e}_n = e_n - e_{n-1} + B_{n-1}\nabla u_{n-1}. \tag{28}$$

Substituting (28) into (24) gives

$$\lim_{n\to\infty} \frac{\| e_n - e_{n-1} + B_{n-1}\nabla u_{n-1} \|}{c_1 + \| \nabla u_{n-1} \|} = 0. \tag{29}$$

By virtue of (22), the expression (29) can then be rewritten as follows:

$$\lim_{n\to\infty} \frac{\| e_n - (I_m - B_{n-1}B_{n-1}^{+})e_{n-1} \|}{c_1 + \| \nabla u_{n-1} \|} = 0. \tag{30}$$

Consider the equation

$$e_n - e_{n-1} = -B\nabla u_{n-1} \tag{31}$$

produced by (1) together with (6). Using this equation, represent (28) and (29) in the form

$$\widetilde{e}_n = (B_{n-1} - B)\nabla u_{n-1}, \tag{32}$$

$$\lim_{n\to\infty} \frac{\| (B_{n-1} - B)\nabla u_{n-1} \|}{c_1 + \| \nabla u_{n-1} \|} = 0. \tag{33}$$

It is clear that if $\| \nabla u_{n-1} \|$ tends to 0 as n goes to infinity, then (33) is always satisfied. Assume that $\lim \sup_{n\to\infty} \| \nabla u_{n-1} \| = \infty$. To study this case, write

$$\lim_{n\to\infty} \frac{\| (B_{n-1} - B)\nabla \overline{u}_{n-1} \|}{1 + c_1 / \| \nabla u_{n-1} \|} = 0, \tag{34}$$

dividing the numerator and the denominator of (33) by $\| \nabla u_{n-1} \|$. In this expression, $\nabla \overline{u}_{n-1} := \nabla u_{n-1} / \| \nabla u_{n-1} \|$ denotes the unit vector of the same direction as ∇u_{n-1}.

It is not hard to establish that when $B_{n-1} \neq B$ and $\sup_{n\in[0,\infty)} \| \nabla u_n \|$ tends to ∞ then zero limit (34) will be satisfied if and only if

$$\nabla \overline{u}_n \xrightarrow[n\to\infty]{} \aleph(B_{n-1} - B), \tag{35}$$

where the notation $\aleph(P)$ of the null-space of an arbitrary matrix P taken from [28, Exercise 2.8.6] has been used.

By definition of $\aleph(\cdot)$, it follows that (35) implies also that

$$\nabla u_n \xrightarrow[n\to\infty]{} \aleph(B_{n-1} - B) \tag{36}$$

becomes the necessary and sufficient condition to achieve the limit (33) for any $\{\nabla u_n\}$. Taking (34) in to account, due to (32) which may be rewritten as

$$\lim_{n\to\infty} \| (B_{n-1} - B)\nabla u_{n-1} \| = 0,$$

result (27) follows. □

Further, the following proposition is advanced.

Proposition. If the adaptation algorithm (17) together with (14) and with $\gamma_n^{(i)}$ chosen as in (18) is applied to the MIMO system (1), then there exist a finite limit

$$\lim_{n\to\infty} B_n = B_\infty \quad (\| B_\infty \| < \infty). \tag{37}$$

This proposition is based on the observation that each $\{b_n^{(i)}\}$ is the so-called Fejer's sequence because $b_n^{(i)}$ is pointwise closer than $b_{n-1}^{(i)}$ to the intersection $\bigcap_{\nu=n}^{\infty} \Gamma_{\nu+1}$ of all the hyperplanes Γ_νs defined in (16) (since they contain the point $b^{(i)}$, this intersection is non-empty set).

Notice that, in this proposition nothing has been said about the convergence $\{B_n\}$ to true B, and it not necessary, in principle.

By virtue of (27) and (37), from the definition (28) of $\widetilde{e}_n$, it follows that our time-varying control system becomes asymptotical close to a time-invariant system described by

$$e_n - (I_m - B_\infty B_\infty^+) e_{n-1} = 0_m \tag{38}$$

as $n \to \infty$, where $0_r := [\underbrace{0, \ldots, 0}_{r}]^T$ denotes the r-dimensional zero vector. Since (38) produces

$$e_n = e_{n-1} \quad \text{with } \| e_n \| < \infty$$

for any integer positive n and for any finite $\| e_0 \| < \infty$ [16, 18], according to [31], it can be concluded that the adaptive control system given in equations (1), (6), (12) has the following main ultimate properties:

$$1) \quad \lim_{n\to\infty} \| e_n - e_{n-1} \| = 0; \tag{39}$$

there is a finite limit

$$2) \quad \lim_{n\to\infty} e_n = e_\infty \quad (\| e_\infty \| < \infty). \tag{40}$$

Using the fact that B is the matrix of full rank (see (4)), from (31) we derive

$$\nabla u_{n-1} = -B^+ (e_n - e_{n-1})$$

to establish

$$\| \nabla u_{n-1} \| \le \| B^+ \| \| e_n - e_{n-1} \|. \tag{41}$$

Due to (39) from (41) it follows that

$$\| \nabla u_{n-1} \| \xrightarrow[n\to\infty]{} 0. \tag{42}$$

By (40) and (42) we conclude that $\{y_n\}$ and $\{u_n\}$ will go to the equilibrium state (u^e, y^e) with $y^e = y^0 - e_\infty$ and $u^e = B^+ y^e$ as n tends to infinity.

Hence, the problem (8) stated in this paper will be solved.

Comment. It can understand that u^{e} may be specified by solving the vector equation

$$B_{\infty}^{+} B u^{e} = B_{\infty}^{+} y^{0} \tag{43}$$

yielding by the condition

$$B_{n}^{+} (\underbrace{y^{0} - B u_{n-1}}_{e_n}) \xrightarrow[n\to\infty]{} 0_{r}$$

under which the equilibrium state should asymptotically be achieved.

A SIMULATION EXAMPLE

To illustrate how the adaptive pseudoinverse model-based control algorithm performs, a simulation of the closed-loop system consisting of the nonsquare memoryless MIMO system (1) (the plant) and of the adaptive controller described in equation (6), (12), (17) together with (13), (14), (21) was conducted. The system to be stabilized at an equilibrium state was given by

$$B = \begin{pmatrix} 0.2 & 1.4 \\ 0.8 & 2.4 \\ 1.1 & 0.5 \end{pmatrix}.$$

with the matrix B of the full rank (rank $B = 2$).

The desired output vector y^{0} was taken as $y^{0} = [2, 7, 3]^{T}$ to ensure $y^{0} \notin \Re(B)$. The duration of the simulation experiment was chosen as long as adaptation of the controller parameters continues.

Table 1 sets out the true system parameters and their initial estimates.

Results of the simulation experiment are presented in Figs. 3 to 5. Fig. 3 shows how the estimate vectors $b_{n}^{(i)}$ $(i = 1, 2, 3)$ move to their final $b_{\infty}^{(i)}$. We can see that they differ from $b^{(i)}$. These final estimates given in Table 1 yield

$$B_{\infty} \cong \begin{pmatrix} 5.83 & 9.63 \\ 4.68 & 8.07 \\ 2.24 & 2.17 \end{pmatrix}.$$

Table 1. **System parameters**

Parameters	$b^{(11)}$	$b^{(12)}$	$b^{(21)}$	$b^{(22)}$	$b^{(31)}$	$b^{(32)}$
True value	0.2	1.4	0.8	2.4	1.1	0.5
Initial value	50	20	30	40	10	10
Final value	≅ 5.83	≅ 9.63	≅ 4.68	≅ 8.07	≅ 2.24	≅ 2.17

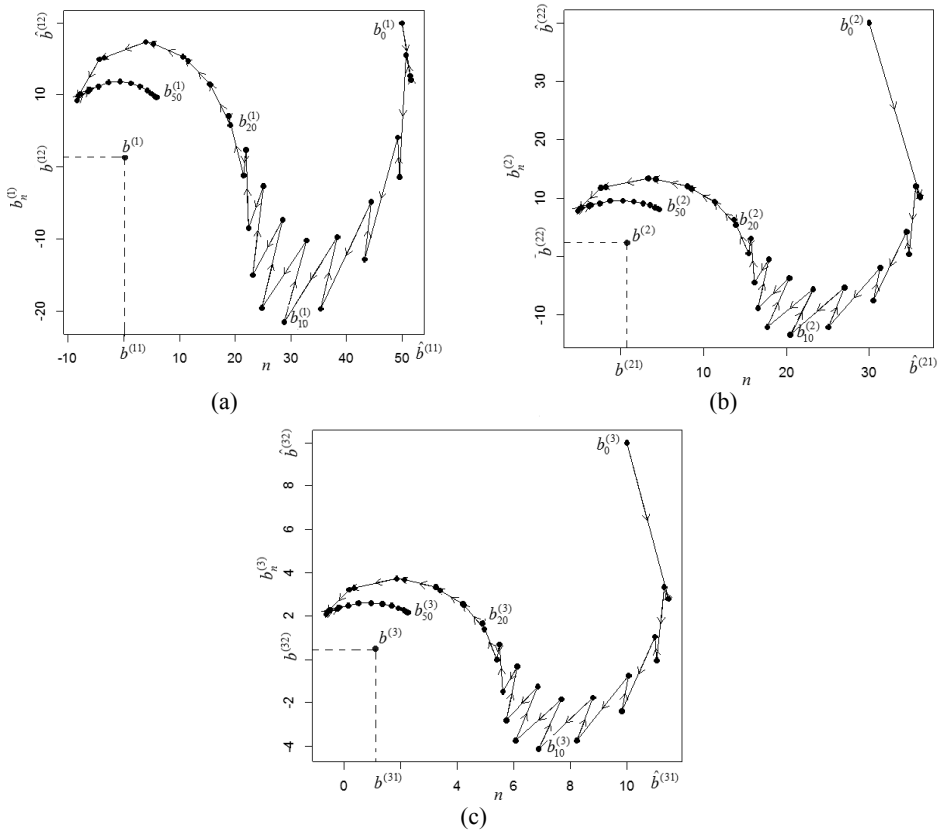

Fig. 3. Trajectories of adaptive estimation processes: (a) Vectors $b_n^{(1)}$; (b) Vectors $b_n^{(2)}$; (c) Vectors $b_n^{(3)}$;

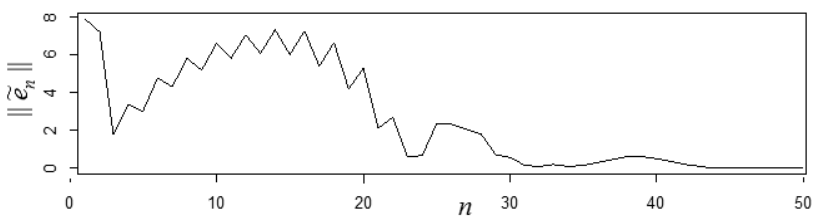

Fig. 4. Norm of estimation error vector

From Fig. 4 it is seen that the norm of the estimation error $\widetilde{e}_n$ converges to 0 as $n \to \infty$ as predicted by the theorem above established. Fig. 5 shows the input control variables $u_n^{(i)}$ $(i = 1, 2)$ and the output variables $y_n^{(i)}$ $(i = 1, 2, 3)$. It is seen from Fig. 5b that the performance of the adaptive controller is satisfactory because this controller is able to stabilize the output vector y_n at some ultimate y_∞ given by

$$y_\infty \cong [2.99, 5.88, 2.75]^T$$

as *n* tends to infinity. Namely, this vector specifies the equilibrium state of the adaptive control system: $y^{\mathrm{e}} = y_\infty$.

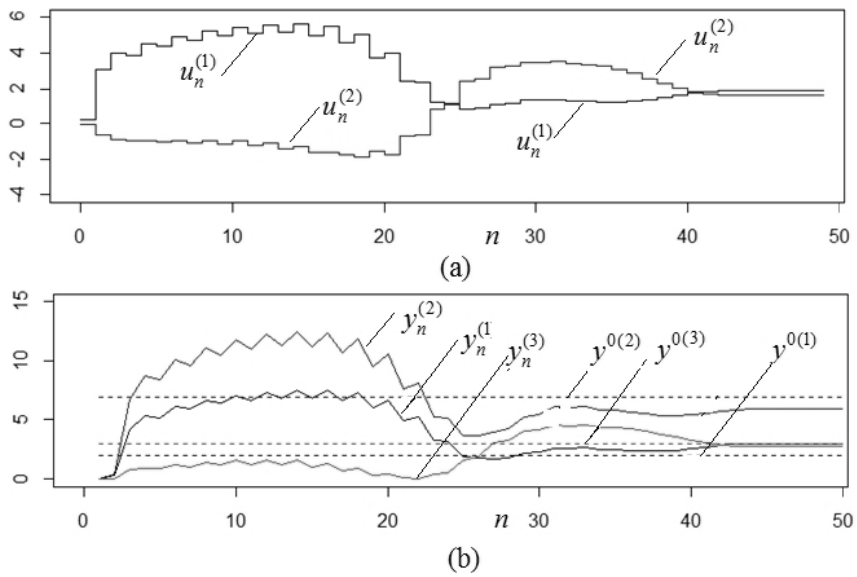

Fig. 5. Systems variables: (a) Control inputs $u_n^{(j)}$; (b) Outputs $y_n^{(i)}$ (solid lines) and desired value $y^0(i)$ (dashed lines)

By solving (43) we numerically determine

$$u^{\mathrm{e}} \cong [1.634, 1.905]^T$$

that is the same as observed in the simulation example (see Fig.5a).

We also see that although the equilibrium state is asymptotically achieved, there is a difference between the components $y^{0(1)}, y^{0(2)}, y^{0(3)}$ of desired output vector y^0 and their ultimate values $y_\infty^{(1)}, y_\infty^{(2)}, y_\infty^{(3)}$, respectively, if $y^0 \notin \Re(B)$.

CONCLUSION

This paper shed light on the adaptive pseudoinverse model-based approach to deal with the stabilization of uncertain nonsquare memoryless MIMO systems in which the number of the outputs exceeds the number of their control inputs. It ensure the asymptotical stabilization of such systems at equilibrium states for any initial estimates of system's parameters. A simulation experiment has demonstrated a good performance of these systems.

REFERENCES

1. Dahleh M.A., Pearson J.B. l_1 optimal-feedback controllers for MIMO discrete-time systems. *IEEE Trans. Autom. Contr.*, 1987, vol. 32, no. 4, pp. 314–322.
2. McDonald J.S., Pearson J.B. l_1 optimal control of multivariable systems with output norm constraints. *Automatica*, 1991, vol. 27, no. 2, pp. 317–329.
3. Maciejowski J. M. *Multivariable Feedback Design*. Wokinghan: Addison-Wesley, 1989.
4. Skogestad S., Postlethwaite I. *Multivariable Feedback Control*. UK, Chichester: Wiley, 1996.

5. Albertos P., Sala A. *Multivariable Control Systems: an Engineering Approach*. London: Springer , 2006.
6. Francis B., Wonham W. The internal model principle of control theory. *Automatica*, 1976, vol. 12, no. 5, pp. 457–465.
7. Brockett R. W. The invertibility of dynamic systems with application to control. *Ph. D. Dissertation*, Case Inst. of Technology, Cleveland, Ohio, 1963.
8. Silverman L. M. Inversion of multivariable linear systems. *IEEE Trans. Autom. Contr*., 1969, vol. AC-14, no. 3, pp. 270–276..
9. Lovass-Nagy V., Miller J. R., Powers L. D. On the application of matrix generalized inversion to the construction of inverse systems. *Int. J. Control*, 1976, vol. 24, no. 5, pp. 733–739.
10. Seraji H. Minimal inversion, command tracking and disturbance decoupling in multivariable systems. *Int. J. Control*, 1989, vol. 49, no. 6, pp. 2093–2191.
11. Marro G., Prattichizzo D., Zattoni E. Convolution profiles for right-inversion of multivariable non-minimum phase discrete-time systems. *Automatica*, 2002, vol. 38, no. 10, pp. 1695–1703.
12. Liu C., Peng H. Inverse-dynamics based state and disturbance observers for linear time-invariant systems. *ASME J. Dyn Syst., Meas. and Control*, 2002, vol. 124, no. 5, pp. 376–381.
13. Lyubchyk L. M. Disturbance rejection in linear discrete multivariable systems: inverse model approach. *Prep. 18th IFAC World Congress*, Milano, Italy, 2011, pp. 7921–7926.
14. Pushkov S. G. Inversion of linear systems on the basis of state space realization. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2018, vol. 57, vo. 1, pp. 7–17.
15. Pukhov G. E., Zhuk K. D. *Synthesis of Interconnected Control Systems via Inverse Operator Method*. Kiev: Nauk. dumka, 1966 (in Russian).
16. Skurikhin V. I., Gritsenko V. I., Zhiteckii L. S., Solovchuk K. Yu. Generalized inverse operator method in the problem of optimal controlling linear interconnected static plants. *Dopovidi NAN Ukrainy*, no. 8, pp. 57–66, 2014 (in Russian).
17. Zhiteckii L. S., Azarskov V. N., Solovchuk K. Yu., Sushchenko O. A. Discrete-time robust steady-state control of nonlinear multivariable systems: a unified approach. *Proc. 19th IFAC World Congress*, Cape Town, South Africa, 2014, pp. 8140–8145.
18. Zhitetskii L. S., Skurikhin V. I., Solovchuk K. Yu. Stabilization of a nonlinear multivariable discrete-time time-invariant plant with uncertainty on a linear pseudoinverse model. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2017, vol. 56, no. 5, pp. 759–773.
19. Zhiteckii L. S., Solovchuk K. Yu. Pseudoinversion in the problems of robust stabilizing multivariable discrete-time control systems of linear and nonlinear static objects under bounded disturbances. *Journal of Automation and Information Sciences*, 2017, vol. 49, no. 5, pp. 35–48.
20. Fomin V. N., Fradkov A. L., Yakubovich V. A. *Adaptive Control of Dynamic Plants*. Moscow: Nauka, 1981 (in Russian).
21. Goodwin G.C., Sin K.S. *Adaptive Filtering, Prediction and Control*. Engewood Cliffs, NJ.: Prentice-Hall, 1984.
22. Landau I. D., Lozano R., M'Saad M. *Adaptive Control*. London: Springer, 1997.
23. Kuntsevich V. M. *Control under Uncertainty: Guaranteed Results in Control and Identification Problems*. Kiev: Nauk. dumka, 2006 (in Russian).
24. Zhiteckii L. S., Skurikhin V. I. *Adaptive Control Systems with Parametric and Nonparametric Uncertainties*. Kiev: Nauk. dumka, 2010 (in Russian).
25. Narendra K. S., Annaswamy A. M. *Stable Adaptive Systems*. NY: Dover Publications, 2012.
26. Ioannou P., Sun J. *Robust Adaptive Control*. NY: Dover Publications, 2013.
27. Aström K. J., Wittenmark B. *Adaptive Control: 2nd Edition*. NY: Dover Publications, 2014.
28. Albert A. *Regression and the Moore-Penrose Pseudoinverse*. New York: Academic Press, 1972.

29. Kaczmarz S. Approximate solution of systems of linear equations. *Internat. J. Control*, 1993. vol. 57, no. 6. pp. 1269–1271.
30. Marcus M., Minc H. *A Survey of Matrix Theory and Matrix Inequalities*. Boston: Aliyn and Bacon, 1964.
31. Desoer C.A., Vidyasagar M. *Feedback Systems: Input–Output Properties*. New York: Elsevier, 1975.

Received 29.03.2018

ЛИТЕРАТУРА

1. Dahleh M.A., Pearson J.B. l_1 optimal-feedback controllers for MIMO discrete-time systems. *IEEE Trans. Autom. Contr.*, 1987, vol. 32, no. 4, pp. 314–322.
2. McDonald J.S., Pearson J.B. l_1 optimal control of multivariable systems with output norm constraints. *Automatica*, 1991, vol. 27, no. 2, pp. 317–329.
3. Maciejowski J. M. *Multivariable Feedback Design*. Wokinghan: Addison-Wesley, 1989.
4. Skogestad S., Postlethwaite I. *Multivariable Feedback Control*. UK, Chichester: Wiley, 1996.
5. Albertos P., Sala A. *Multivariable Control Systems: an Engineering Approach*. London: Springer , 2006.
6. Francis B., Wonham W. The internal model principle of control theory. *Automatica*, 1976, vol. 12, no. 5, pp. 457–465.
7. Brockett R. W. The invertibility of dynamic systems with application to control. *Ph. D. Dissertation*, Case Inst. of Technology, Cleveland, Ohio, 1963.
8. Silverman L. M. Inversion of multivariable linear systems. *IEEE Trans. Autom. Contr*., 1969, vol. AC-14, no. 3, pp. 270–276..
9. Lovass-Nagy V., Miller J. R., Powers L. D. On the application of matrix generalized inversion to the construction of inverse systems. *Int. J. Control*, 1976, vol. 24, no. 5, pp. 733–739.
10. Seraji H. Minimal inversion, command tracking and disturbance decoupling in multivariable systems. *Int. J. Control*, 1989, vol. 49, no. 6, pp. 2093–2191.
11. Marro G., Prattichizzo D., Zattoni E. Convolution profiles for right-inversion of multivariable non-minimum phase discrete-time systems. *Automatica*, 2002, vol. 38, no. 10, pp. 1695–1703.
12. Liu C., Peng H. Inverse-dynamics based state and disturbance observers for linear time-invariant systems. *ASME J. Dyn Syst., Meas. and Control*, 2002, vol. 124, no. 5, pp. 376–381.
13. Lyubchyk L. M. Disturbance rejection in linear discrete multivariable systems: inverse model approach. *Prep. 18th IFAC World Congress*, Milano, Italy, 2011, pp. 7921–7926.
14. Pushkov S. G. Inversion of linear systems on the basis of state space realization. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2018, vol. 57, vo. 1, pp. 7–17.
15. Пухов Г.Е., Жук К.Д. *Синтез многосвязных систем управления по методу обратных операторов*, Киев: Наук. думка, 218 с., 1966.
16. Скурихин В.И., Гриценко В.И., Житецкий Л.С., Соловчук К.Ю. Метод обобщенного обратного оператора в задаче оптимального управления линейными многосвязными статическими объектами. *Доклады НАН Украины*, 2014, №8, С. 57–66.
17. Zhiteckii L. S., Azarskov V. N., Solovchuk K. Yu., Sushchenko O. A. Discrete-time robust steady-state control of nonlinear multivariable systems: a unified approach. *Proc. 19th IFAC World Congress*, Cape Town, South Africa, 2014, pp. 8140–8145.
18. Zhitetskii L. S., Skurikhin V. I., Solovchuk K. Yu. Stabilization of a nonlinear multivariable discrete-time time-invariant plant with uncertainty on a linear pseudoinverse model. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2017, vol. 56, no. 5, pp. 759–773.
19. Zhiteckii L. S., Solovchuk K. Yu. Pseudoinversion in the problems of robust stabilizing multivariable discrete-time control systems of linear and nonlinear static objects under bounded disturbances. *Journal of Automation and Information Sciences*, 2017, vol. 49, no. 5, pp. 35–48.
20. Фомин В.Н., Фрадков А. Л., Якубович В. А. *Адаптивное управление динамическими объектами*. М.: Наук, 448 с., 1981.

21. Goodwin G.C., Sin K.S. *Adaptive Filtering, Prediction and Control*. Engewood Cliffs, NJ.: Prentice-Hall, 1984.
22. Landau I. D., Lozano R., M'Saad M. *Adaptive Control*. London: Springer, 1997.
23. Кунцевич В. М. *Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации*. Киев: Наук. думка, 264с., 2006.
24. Житецкий Л.С., Скурихин В.И. *Адаптивные системы управления с параметрическими и непараметрическими неопределенностями*. Киев: Наук. думка, 301 с., 2010.
25. Narendra K. S., Annaswamy A. M. *Stable Adaptive Systems*. NY: Dover Publications, 2012.
26. Ioannou P., Sun J. *Robust Adaptive Control*. NY: Dover Publications, 2013.
27. Aström K. J., Wittenmark B. *Adaptive Control: 2nd Edition*. NY: Dover Publications, 2014.
28. Albert A. *Regression and the Moore-Penrose Pseudoinverse*. New York: Academic Press, 1972.
29. Kaczmarz S. Approximate solution of systems of linear equations. *Internat. J. Control*, 1993. vol. 57, no. 6. pp. 1269–1271.
30. Marcus M., Minc H. *A Survey of Matrix Theory and Matrix Inequalities*. Boston: Aliyn and Bacon, 1964.
31. Desoer C.A., Vidyasagar M. *Feedback Systems: Input–Output Properties*. New York: Elsevier, 1975.

Получено 29.03.2018

Л.С. Житецький, канд. техн. наук,
в.о. зав. відд. інтелектуальних автоматичних систем
e-mail: leonid_zhiteckii@i.ua
К.Ю. Соловчук, аспірантка
e-mail: solovchuk_ok@ukr.net
Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій
та систем НАН України і МОН України, пр. Академіка Глушкова, 40,
м. Київ, 03187, Україна

АДАПТИВНА СТАБІЛІЗАЦІЯ ДЕЯКИХ БАГАТОВИМІРНИХ СИСТЕМ З ПРЯМОКУТНИМИ МАТРИЦЯМИ КОЕФІЦІЄНТІВ ПІДСИЛЕННЯ ПОВНОГО РАНГУ

Вступ. У статті поставлено та розв'язано одну нову задачу, яка стосується адаптивної стабілізації положення рівноваги певного класу лінійних багатовимірних дискретних систем без пам'яті з прямокутними матрицями коефіцієнтів підсилення. Цей клас включає багатовимірні системи, у яких кількість виходів перевищує кількість входів керування. Введено припущення, що невідомі матриці коефіцієнтів підсилення мають повний ранг.

Метою даного дослідження є відповідь на питання про те, чи можна реалізувати адаптивний підхід на основі псевдообернеої моделі для керування невизначеною багатомірною системою без пам'яті, в якій кількість входів керування є менша за кількість вихідних змінних.

Результати. Показано, що оцінки параметрів, які формуються стандартною адаптивною рекурентною процедурою проекційного типу, завжди збігаються до деяких скінченних значень за будь-яких початкових оцінок параметрів системи. Доведено, що адаптивний закон керування на основі псевдообернеої моделі дозволяє досягти положення рівноваги системи, яка підлягає керуванню. Асимптотичні властивості системи керування з адаптивним зворотним зв'язком, встановлені теоретично, підтверджуються модельним експериментом.

Висновки. Встановлено, що гранична поведінка замкненої системи керування з використанням адаптивної концепції, основаної на псевдообернені, є задовільною.

***Ключові слова*:** адаптивне керування, багатовимірна система, дискретний час, зворотний зв'язок, псевдообернення, стійкість, невизначеність.

Л.С. Житецкий, канд. техн. наук,
и.о. зав. отд. интеллектуальных автоматических систем
e-mail: leonid_zhiteckii@i.ua
К.Ю. Соловчук, аспирантка
e-mail: solovchuk_ok@ukr.net
Международный научно-учебный центр информационных технологий
и систем НАН Украины и МОН Украины,
пр. Академика Глушкова, 40, г. Киев, 03187, Украина

АДАПТИВНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ НЕКОТОРЫХ МНОГОМЕРНЫХ СИСТЕМ С ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ МАТРИЦАМИ КОЭФФИЦИЕНТОВ УСИЛЕНИЯ ПОЛНОГО РАНГА

Введение. В настоящей статье ставится и решается одна новая задача, касающаяся адаптивной стабилизации положения равновесия определенного класса линейных многомерных дискретных систем без памяти с прямоугольными матрицами коэффициентов усиления. Этот класс включает многомерные системы, у которых число выходов превышает число управляющих входов. Предполагается, что неизвестные матрицы коэффициентов усиления имеют полный ранг.

Цель этой статьи — ответить на вопрос, можно ли реализовать адаптивный подход на основе псевдообратной модели для управления неопределенной многомерной системой без памяти, в которой число управляющих входов меньше числа выходных переменных.

Результаты. Показано, что оценки параметров, генерируемые стандартной адаптивной рекуррентной процедурой проекционного типа, всегда сходятся к некоторым конечным значениям для любых начальных оценок параметров системы. Доказано, что адаптивный псевдообратный закон управления позволяет достичь положения равновесия управляемой системы. Асимптотические свойства адаптивной системы управления с обратной связью, полученные теоретически, подтверждены модельным экспериментом.

Выводы. Установлено, что предельное поведение замкнутой системы управления, построенной на основе адаптивного псевдообращения, является удовлетворительным.

***Ключевые слова*:** адаптивное управление, многомерная система, дискретное время, обратная связь, псевдообращение, устойчивость, неопределенность.

Медицинская и биологическая кибернетика

DOI: https://doi.org/10.15407/kvt192.02.061

UDC 519.71+ 004.652.4+004.827

A.B. BUZYNOVSKY[1], PhD Student,
e-mail: arturdoc1983@ukr.net
O.S. KOVALENKO[1], D.Sc. (Medicine), Professor,
Head of Medical Information Systems Department
e-mail: askov49@gmail.com
N.R. BAYAZITOV[2], D.Sc. (Medicine),
Professor at the Surgery Department
e-mail: ics_video@ukr.net
L.S. GODLEVSKY[2], D.Sc. (Medicine), Professor,
Chief of the Department of Biophysics, Informatics and Medical Devices
e-mail: godlevskyleonid@yahoo.com
[1] International Research and Training Center for Information Technologies
and Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine
and Ministry of Education and Science of Ukraine,
Acad. Glushkova av., 40, Kiev, 03187, Ukraine
[2] Odessa National Medical University,
Valekhovsky Lane, 2, Odessa, 65082, Ukraine

THE EFFECTIVENESS OF SURGEON DECISION ON PAIN SYNDROME OF PELVIC ORIGIN TREATMENT IN WOMEN ESTIMATED WITH THE MODEL OF DECISION TREE

Introduction. *The problem of correct diagnostics with the decision on the consequent adequate treatment of diseases which are causative for pelvic pain syndrome in women is actual for 15–24% women of fertile age.*

The purpose *of the work is to investigate the effectiveness of different methods of treatment women with pain syndrome originated from pelvis and lower part of abdomen on the basis of retrospective analysis of 1092 histories of diseases during 2013–2017 p.p.,*

Methods*. Method of decision tree building up was used. The probability of different outcomes — restoration of health, recurrence of the disease along with the perioperative complications as well as duration of treatment in each case were taken into consideration as informative indices for decision tree composing. On the basis of mentioned data the index of effective period of treatment (EPT) was calculated. Period of observation was six months from the moment of disease diagnostics.*

Results*. It was established that the probability of complete health restoration was 0,83 after surgical treatment and 0,62 after drug treatment. In case of initial inefficiency of drug*

© A.B. BUZYNOVSKY, O.S. KOVALENKO, N.R. BAYAZITOV, L.S. GODLEVSKY, 2018

treatment the probability of restoration of health as a result of surgical intervention was 0,40. The EPT in surgically treated patients was less than EPT in patients with therapeutic treatment by 3,29 times at the moment of making decision on the method of treatment.

***Conclusions**. It was concluded that early decision on surgical intervention as a method of diagnostics and treatment was more effective when compared with the drug method of treatment women with pelvic pain syndrome. Dependence of the treatment effects upon perioperative complications serve as forecasting data for individual medical care delivered during postoperative period.*

***Keywords:** tree of decision, undertaking of decision in surgery, pain syndrome, the effectiveness of treatment estimation.*

INTRODUCTION

Making decisions in surgical practice very often is performed under conditions of time shrinkage and uncertainty of symptoms. That is why correct chose of optimal decision on diagnostics and treatment is complicated [1–5]. From other side, looking for the identification of moments of surgeon's decision making and converting that process into autonomic informational support regime makes delivering surgical service more reliable and effective [1, 2]. Especially such an approach is of worth for syndromes with uncertain symptoms manifestations such as pain pelvic manifestations in women [6]. Taking into consideration that diagnostic and treatment mistakes are observed almost in one half of women with pain pelvic syndrome [4, 6], the working out the system aimed for support of surgeon decision is regarded as a great challenge with substantial practical consequences.

The building up of decision tree permits to estimate the effectiveness of treatment [7–9]. This method has not been used for the laparoscopic intervention effectiveness estimation in women with pelvic pain syndrome till the last time.

The purpose of the investigation is confined to perform retrospective comparative estimation of the effectiveness of surgical and conservative treatment of women with the pelvic pain and pain in the lower part of abdomen.

PROBLEM STATEMENT

The problem of heightening of diagnostics and treatment pelvic pain in women is especially actual taking into consideration that painful syndrome originated from pelvis and lower parts of abdomen is met in 15–24% of women of fertile age as well as both from 10 to 35% of diagnostic laparoscopies and up to 12% of hysterectomies are performed in women with chronic pelvic pain in developed countries [6]. Such aspect as differential diagnostics of appendicitis and inflammation of pelvic organs is also included as a separate and most contributive to the general problem on the effectiveness of diagnostics and treatment of pelvic pain per se [4, 6].

Hence, investigations aimed for comparative analysis of different methods of surgical and therapeutic treatment of women with pelvic pain is of outstanding practical significance. The creation of regression trees of decisions are among those methods which permit to perform such analysis. [10]. It is of worth to note that tree of regression is valid for the effect of treatment identification which is based on such argument as duration of patient's staying at hospital [10].

CHARACTERISTICS OF THE VOLUME AND METHODS OF INVESTIGATIONS

The volume of investigations. All results were gained in the course of retrospective analysis of histories of diseases of women, who were treated at Odessa Regional Clinical Hospital during 2013–2017 years with the pelvic pain and pain at lower part of abdomen as an indication for the treatment. Altogether 1092 histories of diseases of women from 18 up to 47 years old have been analyzed.

Criteria on the inclusion into investigation were the next:

- fertile age of women;
- the presence of painful syndrome of pelvic or / and lower abdomen origin;
- the performance of laparoscopic diagnostics along with the performing of laparoscopic treatment in the anamnesis;
- clear and reliable chance for the expert estimation of the effectiveness of diagnostics and treatment as well as possibility to estimate such informative parameters as complications incidence, duration of staying at hospital after first and repeated women's advertising for medical help.

Methods of the analysis. The calculation of the effectiveness of treatment was performed on the basis of probability of restoration of patient's health, and duration of the period of hospital treatment, which was measured in days. Besides, the probability of the recurrence of the disease (syndrome) as well as the duration of repeated hospital period of treatment was taken into account. The recurrence of disease was identified as repeated advertising of the patient with the same symptoms on the painful syndrome originated from pelvis and lower part of abdomen. The period between the moment of discharging from previous treatment and repeated advertising for medical help was estimated in days and was taken as an informative parameter for the effectiveness of treatment estimation. All histories of diseases were analyzed for the period of half of a year from the moment of the first women observation at hospital.

Taking into consideration of the possibility of quantitative estimation performing using tree decisions method [3, 8] the quantification of the effectiveness of treatment was performed with the index "effective period of treatment" (EPT). Such an index was calculated in accordance to the equation:

$$EPT = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \; P(A), \tag{1}$$

where x_i — an average length of treatment period; P — probability of successful result of treatment (health restoration); n — number of patients.

Similarly, in case of recurrence of disease and repeated treatment, EPT was calculated as an averaged number of days after the first discharging from the hospital multiplied by the probability of the recurrence of disease. Taking into consideration the well-known fact on the reversed dependence between the length of period before recurrence of the disease and the effectiveness of treatment [5, 6], the EPT for repeated medical care was calculated as reversed value of average length of period free from pain syndrome after the first treatment multiplied by 100 and by weight coefficient (Q=10). That was necessary for correct comparison of EPT calculated for the first period of treatment with the

EPT of treatment performed after recurrence of disease:

$$EPT = \frac{1}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i} \times 100 \times Q \times P(A). \quad (2)$$

THE GENERAL CHARACTERISTICS OF TREATMENT RESULTS

Surgical treatment results. In the accordance with retrospective analysis, it was established that 828 patients (75,8%) have been treated surgically while the rest 234 patients (24,2%) were treated therapeutically.

Intraoperative complications were registered in 84 patients (10,1%), and in 48 out of them complications were also revealed during postoperative period (Fig. 1). The mean duration of the treatment of intraoperative complications was 11,84 ± 1,13 days, while postoperative ones were treated during — 17,52 ± 1,22 days. It is worth to note that recurrence of disease was observed in 32 out of 48 patients in the subgroup of patients with both intra- and postoperative complications, while the rest of them (16 patients, 33,3%) successfully discharged from hospital. The recurrence of disease was registered in 16 out of 36 patients, who had only postoperative complications, while the rest 20 patients were successfully discharged from hospital (Fig.1). Those patients who were surgically treated and free from intraoperative complications (744 patients) demonstrated postoperative complications in 76 cases (10,2%), while the majority of them (668 patients) have been discharged from the hospital after 4,57 ± 0,81 days of treatment. Later on 68 patients out from those 668 have advertised for medical help again after 97,50 ± 6,42 days free from pain syndrome period.

Therapeutic treatment results. 264 patients (24,2%) have started with drug-based conservative treatment (Fig. 1). The successful results of 23,41 ± 2,51 days of treatment was observed in 108 patients (40,9%). The recurrence of the disease was registered in the rest 156 (59,0%) patients after 33,92 + 2,85 days of treatment. The corrected drug-based treatment was restarted in 56 out of those 156 patients with the success ful result in 27,22 ± 3,35 days of treatment. The rest 100 patients were decided to treat surgically, and in 44 (44,0%) of them the intraoperative complications have been registered, which have been successfully therapeutically treated in 16,03 ± 1,52 days. Besides, in 28 out of 44 patients postoperative complications have been precipitated as well. The majority of patients with both intra- and postoperative complications (71,4%) suffered from the recurrent pain syndrome, which renovated in average of 50,83 ± 6,74 days, while successful treatment, which was registered in eight patients, finished in 37,32 ± 4,59 days of treatment. Those patients who had intraoperative complications without postoperative ones the renovated pain symptoms was seen in 74,51 ± 7,45 days (eight patients), while successful treatment was observed in 16,33 ± 2,92 days of treatment (eight patients).

The postoperative complications were observed in 36 out of 56 patients who had not intraoperative ones. In 24 out of these 36 patients suffered from the recurrence of disease in average of 70,3 ± 5,8 days. Successful treatment was performed in 12 out of those 24 patients in 27,0 ± 3,4 days. The successful discharging from hospital after 6,33 ± 0,62 days of treatment was registered in

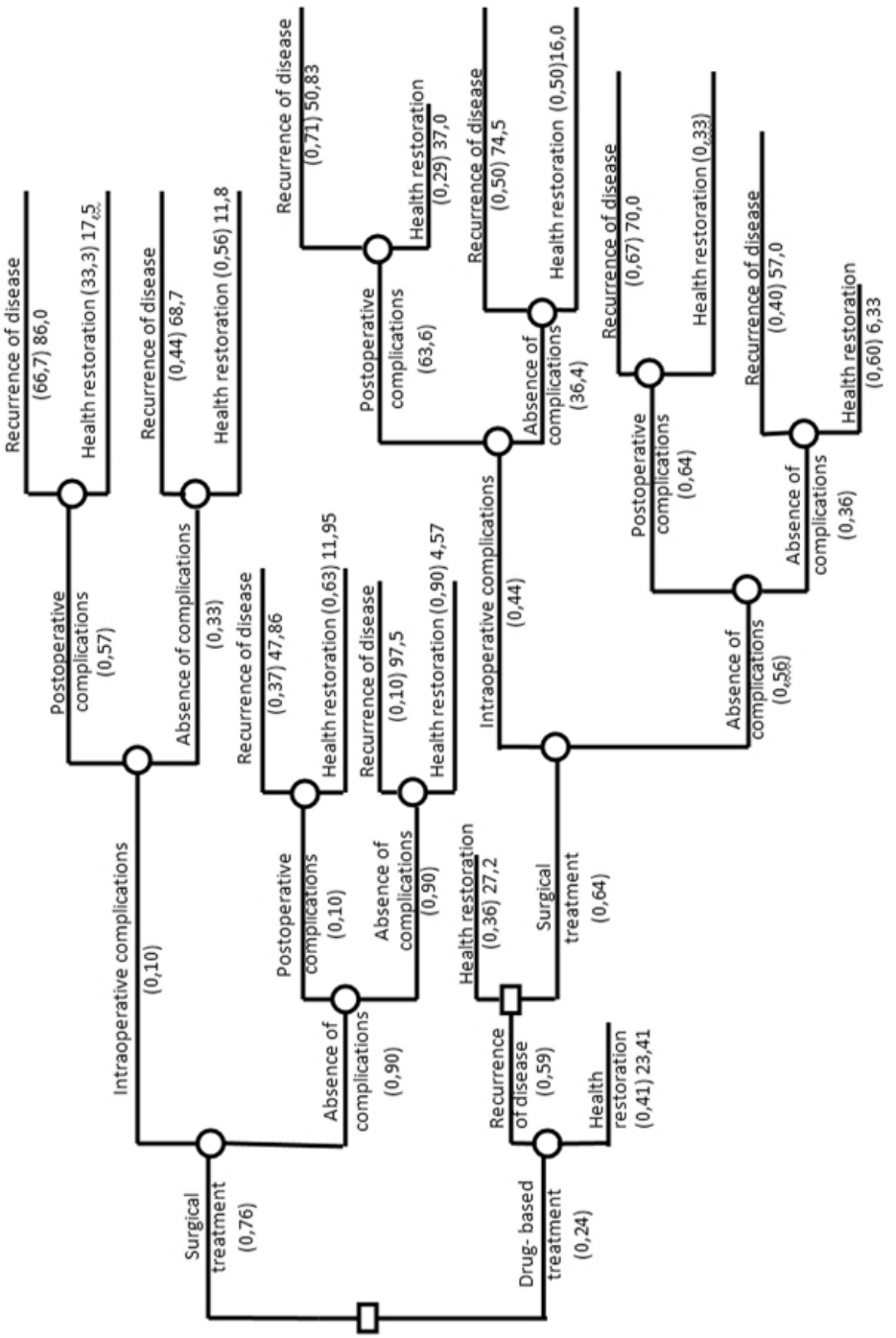

Fig. 1. Graph on the effectiveness of medical service delivering to patients with chronic pelvic pain. Notes: at this and next figure — the probability of correspondent patient's state (in brackets), and duration of treatment (days) — nearby brackets.

12 out of 20 patients, who did not demonstrate both intra- and postoperative complications (Fig. 1). The rest eight patients have been advertised for medical help with renovated pain syndrome in 57,3 $\pm$ 6,7 days.

THE COMPARATIVE EFFECTIVENESS OF SURGICAL AND CONSERVATIVE TREATMENT

The clear rising of EPT was evident when it was compared with such one measured in patients treated surgically in patients resistant to drug-based treatment with such one in patients who were treated surgically from the very beginning (Table 1).

The EPT in surgically treated patients, who did not suffer from complications, was two times less when compared with EPT in patients with perioperative complications (Fig. 2). It should be stressed that EPT in patients with successful initial surgical treatment was less by 2,68 times when compared with such one registered in patients whom surgical intervention was performed after therapeutic treatment (Fig. 2, B). EPT in patients with recurrent disease, which was registered after initial therapeutic treatment was higher when compared with such one in patients with primarily surgical treatment by 3,17 times (Fig. 2, C). Finally, the EPT in surgically treated patients was less than EPT in patients with therapeutic treatment by 3,29 times at the moment of making decision on the method of treatment (Fig. 2, D).

Hence, gained data as a result of retrospective analysis are in favor for different type of treatment as an initial decision for women with pelvic pain syndrome. Surgical or drug treatment has been chosen on the basis of both actual medical protocol and patients desire to be involved in surgical or drug-based treatment. Also it was established that surgical and therapeutic treatment has had different consequences with respect to complications precipitance and patient's repeated advertisement for medical help. Thus, in case of drugs prescription recovery was observed with the probability of 0,62 including recovery after repeated medical help delivering. Similar probability after surgical treatment was 0,83. But surgical treatment which has been delivered after therapeutic treatment was followed by recovery with a probability of 0,40. Such low value is in favor for reduced effectiveness of surgical treatment under conditions of ineffectiveness of drug treatment of pelvic pain syndrome. The lowering of surgery effectiveness might be explained by both resistance of the disease to treatment and increasing of disease severity [4, 6]. It should be emphasized that this fact points on importance of earlier diagnostics and surgery intervention in women with pelvic pain syndrome.

Table 1. **EPT values depending upon the type of complications and the type of primarily treatment**

Type of the initial treatment	Type of complications		
	Intraoperative	Postoperative	Perioperative (Both)
Surgical	12,99	15,30	13,56
Conservative (therapeutical or drug-based)	14,70	18,48	24,73

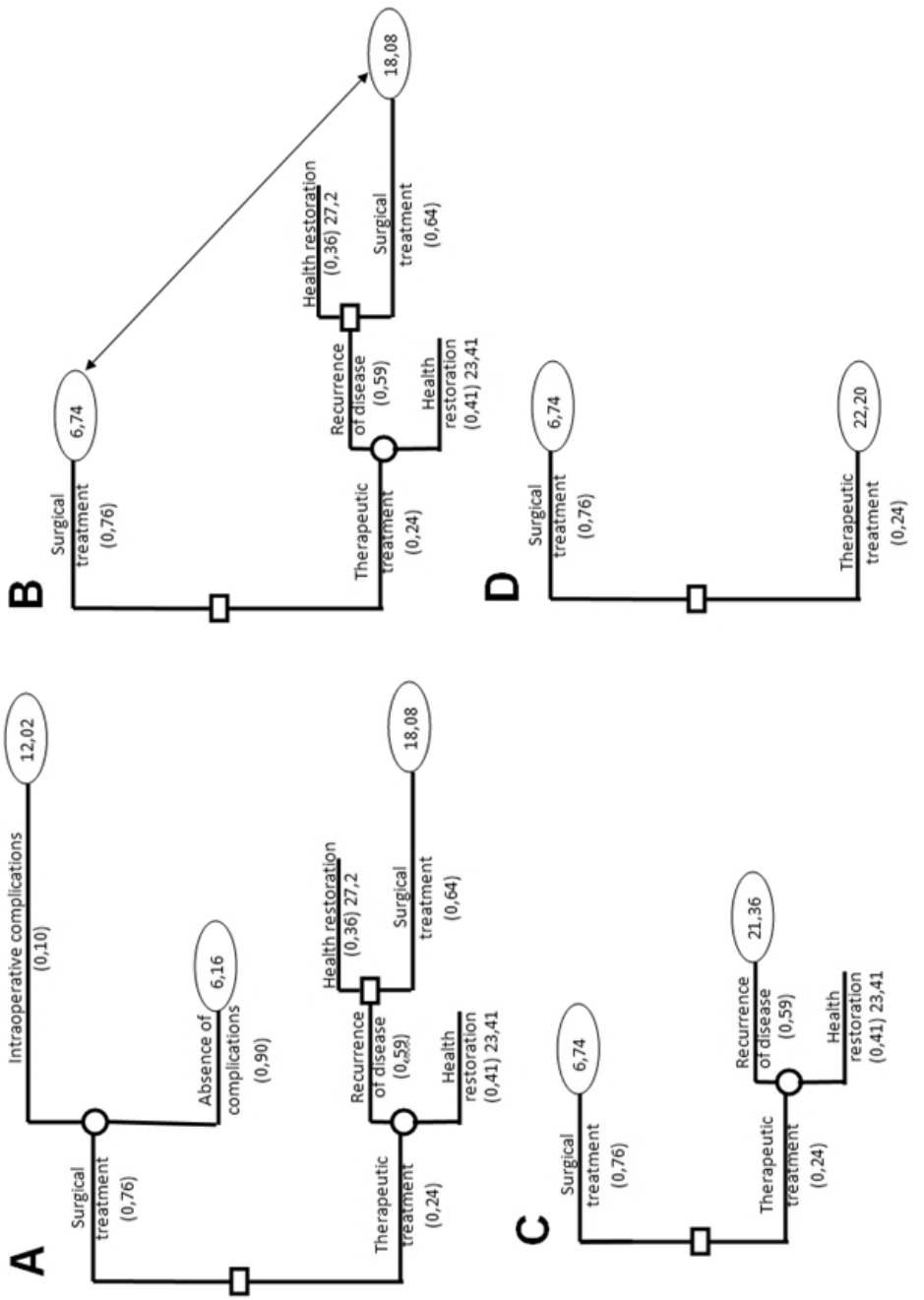

Fig. 2. Stages on EPT (inside ellipses) calculations in the course of clarifying the effect of intraoperative complications (A), comparison of the effectiveness of surgical treatment after the first advertisement for medical help and after recurrence of pain syndrome as a result of the resistance to therapeutic treatment — marked with arrows (B), as well as comparison of the effectiveness of surgical and therapeutic treatment (C and D).

EPT-index proved to be effective in the course of evaluation of effectiveness of treatment methods as far as it includes probability of possible results of treatment, duration of treatment and similar characteristics for cases of disease recurrence. Thus, gained data revealed that EPT of those patients who have suffered from postoperative complications with the absence of intraoperative ones was 2,98 times fold greater when compared with the EPT of patients who were successfully treated and avoided preoperative complications. Similar ratio of ETP (1,71 times) was observed in patients who were treated therapeutically from the very beginning pertained to patients whom surgical intervention was performed secondarily to the initial drug-based treatment. It is also worth to note that ETP was higher in all groups of patients who were treated initially therapeutically when compared with data gained in groups of patients who began with surgical treatment.

Gained data are in favor for the recommendation to concentrate resources of the system of surgeon decision support on the crucial decision — the chose method of treatment of women who suffered from pelvic pain and pain at lower part of abdomen with uncertain origin at the moment of their entrance to hospital. Also it is important to pay proper attention to chose method of diagnostics and treatment of those women who were resistant to the initial therapeutical treatment.

CONCLUSIONS

The process of the delivering of medical care to patients with pelvic pain syndrome is possible to model at satisfactory level with the method of decision tree creation. Using such an approach the critical points — decisions which are followed by different level of effectiveness of treatment is possible to identify

In accordance to gained data on the effectiveness of patients treatment who were successfully discharged from hospital, but advertised again after recurrence of pain syndrome it was established that in-time performed surgical treatment permitted to get better results when compared with drug-based treatment.

Surgical treatment performed after primarily delivered drug- based treatment is followed by greater number of both intra — and postoperative complications as well as by prolonged hospital period of treatment when compared with patients who were started in-time with surgery.

REFERENCES

1. Lyashenko A.V., Bayazitov N.R., Godlevsky L.S. et al. Informational-technical system for automatized laparoscopic diagnostics. *Radioelectronics, computer sciences and control.* 2016. № 4. P. 90–96. (in Ukrainian).
2. Egorov A.A., Mikshina V.S. The models of surgeon decision. *Letters on New Medical Technologies,* 2011, Vol.. 7, №4. P. 178–81. (in Russian)
3. Litvin A.A., Litvin V.A. Systems of decision support in surgery. *News of Surgery,* 2014. № 1. P. 96–100. (in Russian)
4. Kucey D.S. Decision analys is for the surgeon. *World J.Surg*, 1999. Vol. 23. P. 1227–1231.
5. Sears E.D., Chung K.C. Decision analysis in plastic surgery: A Primer. *PlastReconstrSurg*. 2010. Vol. 126, N4. P. 1373–1380.
6. Ozerskaya I.A., Ageeva M.I. Chronic pelvic pain in women of fertile age. Ultrasonic diagnostics. Moscow 2009. 299 p. (in Russian)
7. Kiryanov B.F., Tokmachov M.S. Mathematical models in health care: text-book. Novgorod, 2009. 279 p. (in Russian)

8. Rudenko S.V., Romanenko M.V., Katunina O.G., Kolesnikova E.V. Markov models of patients state changes in projects of delivering medical service. *Control of complicated systems development*. 2012. №12. P. 86–89. (in Ukrainian)
9. Detsky A.S., Nagile G., Krahnetal M.D. Primer on medical decision analysis: Part 2. Building a tree. *MedDecis Making*. 1997. Vol. 7. P. 126–135.
10. Classification Breiman L., Friedman J.H., Olshen R.A., Stone C.J. Classification and regression trees. Monterey, CA 1984. 368 p.

Reseived 12.10.2017

ЛИТЕРАТУРА

1. Ляшенко А.В., Баязітов М.Р., Годлевський Л.С. і співавт. Інформаційно-технічна система автоматизованої лапароскопічної діагностики. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2016. № 4. С. 90–96.
2. Егоров А. А., Микшина В. С. Модель принятия решения хірурга. *Вестин. новых мед. технологий*. 2011. Т. 7, №4. С. 178–81.
3. Литвин А.А., Литвин В.А. Системы поддержки принятия решений в хирургии. *Новости хирургии*. 2014. № 1. С. 96–100.
4. Kucey D.S. Decision analys is for the surgeon. *World J.Surg*. 1999. Vol. 23. P. 1227–1231.
5. Sears E.D., Chung K.C. Decision analysis in plastic surgery: A Primer. *PlastReconstrSurg*. 2010. Vol. 126, N 4. P. 1373–1380.
6. Озерская И.А., Агеева М.И. *Хроническая тазовая боль у женщин репродуктивного возраста. Ультразвуковая діагностика*. М.: Видар-М., 2009. 299 с.
7. Кирьянов Б.Ф., Токмачёв М.С. *Математические модели в здравоохранении: учеб. Пособие*. В. Новгород: НовГУ им. Ярослава Мудрого. 2009. 279 с.
8. Руденко С.В, Романенко М.В., Катуніна О.Г., Колеснікова Е.В. Розробка марківської моделі зміни станів пацієнтів в проектах надання медичних послуг. *Управління розвитком складних систем*. 2012, №12. С. 86–89.
9. Detsky A.S., Naglie G., Krahnetal M.D. Primer on medical decisionanalysis: Part 2. Building a tree. *MedDecis Making*. 1997. Vol. 7. P. 126–135.
10. Breiman L., Friedman J.H., Olshen R.A., Stone C.J. *Classification and regression trees*. Monterey, CA: Wadsworth & Brooks/Cole Advanced Books & Software. 1984. 368 p.

Получено 12.10.2017

А.Б. Бузиновський[1], аспірант,
e-mail: arturdoc1983@ukr.net
О.С. Коваленко[1], д-р мед.наук, проф.,
зав. відд. медичних інформаційних систем
e-mail: askov49@gmail.com
М.Р. Баязітов[2], д-р мед.наук,
професор кафедри хірургії
e-mail: ics_video@ukr.net
Л.С. Годлевський[2], д-р мед.наук, проф.,
зав. каф. біофізики, інформатики і медичної апаратури
e-mail: godlevskyleonid@yahoo.com
[1] Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій
та систем НАН України і МОН України,
пр. Академіка Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна
[2] Одеський національний медичний університет,
Валіховський пров., 2, м. Одеса, 65082, Україна

ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ХІРУРГОМ У РАЗІ БОЛЬОВОГО СИНДРОМУ МИСКОВОГО ПОХОДЖЕННЯ ЗА ДОПОМОГИ МОДЕЛІ ДЕРЕВА РІШЕНЬ

Вступ. Проблема коректної діагностики і прийняття рішення щодо адекватного лікування захворювань, які є причиною больового синдрому мискового походження, є важливою, оскільки синдром трапляється у 15–24% жінок репродуктивного віку.

Мета роботи полягає у порівнянні ефективності різних методів лікування жінок з больовим синдромом мискового походження на основі ретроспективного аналізу 1092 історій хвороб пацієнтів, яким лікування було надано в період 2013–2017 р.р.

Методи дослідження. Використано метод побудови моделі дерева рішень. В якості інформаційних критеріїв побудови моделі було використано імовірність одужання, час відновлення проявів захворювання після лікування, імовірність виникнення періопераційних ускладнень, а також тривалість лікування. На основі вказаних критеріїв розраховано показник ефективного періоду лікування. Період спостереження пацієнтів складав півроку з моменту виникнення больового синдрому.

Результати дослідження. Встановлено, що імовірність повного відновлення здоров'я склала 0,83 після хірургічного і 0,62 після консервативного лікування. У випадку, коли первинне консервативне лікування не приводило до одужання, імовірність одужання після проведення хірургічного втручання дорівнювала 0,40. Ефективність періоду лікування, розрахована для пацієнтів з первинним хірургічним лікуванням, була менша в 3,29 разу у порівнянні з ефективністю, розрахованої для пацієнтів з первинним консервативним лікуванням.

Висновки. Своєчасне прийняття рішення щодо хірургічного лікування захворювань, які є причиною больового синдрому мискового походження, є ефективнішим у порівнянні із застосуванням медикаментозного лікування. Визначена залежність ефективності лікування від періопераційних ускладнень може слугувати в якості прогностичних критеріїв стану пацієнта в післяопераційному періоді.

Ключові слова: *дерево рішень, прийняття рішення в хірургії, больовий синдром, оцінка ефективності лікування.*

А.Б. Бузиновский[1], аспирант,
e-mail: arturdoc1983@ukr.net
А.С. Коваленко[1], д-р мед.наук, проф.,
зав. отд. медицинских информационных систем
e-mail: askov49@gmail.com
Н.Р. Баязитов[2], д-р мед.наук, професор каф. хирургии,
e-mail: ics_video@ukr.net
Л.С. Годлевский[2], д-р мед.наук, проф.,
зав. кафедрой биофизики, информатики и медицинской аппаратуры
e-mail: godlevskyleonid@yahoo.com
[1] Международний научно-учебный центр информационных технологий
и систем НАН Украины и МОН Украины,
пр. Академика Глушкова, 40, г. Киев, 03187, Украина
[2] Одесский национальный медицинский университет,
Валеховский пер., 2, г. Одесса, 65082, Украина

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ХИРУРГОМ ПРИ БОЛЕВОМ СИНДРОМЕ ТАЗОВОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ ДЕРЕВА РЕШЕНИЙ

Проведены ретроспективные исследования эффективности принятия решений при диагностике и лечении пациентов хирургического профиля — женщин, страдаючих хроническим болевым синдромом. Результаты анализа историй болезни 1092 пациенток, которым была оказана врачебная помощь в период 2013–2017 г.г., проведенного на основе построения дерева решений, показали, что вероятность выздоровления при проведении хирургического вмешательства составила 0,83, в то время как при проведении медикаментозного лечения — 0,62. В случае неэффективности медикаментозного лечения вероятность выздоровления уменьшалась до 0,40. Определены ключевые моменты применения системы поддержки решений хирурга, позволяющие повысить эффективность лечения данной категории пациентов.

Ключевые слова: *дерево решений, принятие решений хирургом, болевой синдром,оценка эффективности лечения*.

DOI: https://doi.org/10.15407/kvt192.02.072

UDC 004.4:616.89-008.45/.47-02:616.831-005

L.M. RYSOVANA[1], Assistant,
Department of Medical and Biological Physics and Medical Informatics
e-mail: rluba_24@ukr.net
O.V. VYSOTSKA[2], D.Sc. (Engineering), Professor,
Professor of the Department of Information Control Systems
e-mail: evisotska@ukr.net
[1] Kharkov National Medical University,
Nauky ave., 4, 61022, Kharkiv, Ukraine
[2] Kharkov National University of Radio Electronics,
Nauky ave., 14, 61166, Kharkiv, Ukraine

INFORMATION SYSTEM OF DETECTION OF EMOTIONAL AND COGNITIVE DISORDERS IN PATIENTS WITH DISCIRCULATORY ENCEPHALOPATHY

Introduction. *In modern conditions, there are topical issues of studying the mechanisms of formation and specificity of clinical manifestations of discirculatory encephalopathy in the able-bodied population. A large number of interrelated indicators that characterize emotional and cognitive disorders, the analysis of which requires the use of mathematical methods and software, determined the need to develop an information system for the detection of emotional and cognitive disorders in patients with discirculatory encephalopathy.*

The purpose of the article *is to develop a medical information system for the detection of emotional and cognitive disorders in patients with discirculatory encephalopathy, which increases the accuracy of diagnosis.*

Materials and methods. *The article uses mathematical statistics methods for processing diagnostic information; methods of mathematical modeling for constructing mathematical models for detecting the likelihood of emotional disorders and identifying and determining the severity of cognitive disorders in patients with discirculatory encephalopathy; methodical bases of construction of information technologies in medicine at construction of information system of revealing emotional and cognitive disorders in patients with discirculatory encephalopathy.*

Results. *During the writing of the article, a method was developed for detecting emotional and cognitive disorders in patients with discirculatory encephalopathy, including the definition of the likelihood of emotional disorders, the exposure vector for psychocorrection, the detection of cognitive disorders and determining their severity, and predicting the further development of cognitive disorders. A structural diagram of the medical information system "CognitiveDE" has been developed, which determines the composition and purpose of its main modules, and has allowed to develop a methodological basis for describing the interac-*

© L.M. RYSOVANA, O.V. VYSOTSKA, 2018

tion of the elements of the biological and technical subsystems. The software of the medical information system "CognitiveDE" was verified, which showed the compliance of the results of the individual stages of the system development with the requirements and restrictions formulated for them.

Conclusions. *Using the developed method for detecting emotional and cognitive disorders in patients with discirculatory encephalopathy, based on developed mathematical models for determining the likelihood of emotional disorders and determining the severity of cognitive disorders, allows correctly diagnosing emotional and cognitive disorders.*

The presented medical information system can be used by doctors of the neurological and psychiatric departments and medical psychologists to improve the accuracy and reduce the time of diagnosis of emotional and cognitive disorders.

Keywords: *medical information system, assessment method, cognitive and emotional disorders, discirculatory encephalopathy.*

INTRODUCTION

The cerebrovascular diseases (CVD) represent today a significant social and economic problem throughout the world [1, 2].

In recent years there has been a persistent tendency of increasing the chronic form of CVD (discirculatory encephalopathy (DEP)). In modern conditions, there are topical issues of studying the mechanisms of formation and specificity of clinical manifestations of DEP in the able-bodied population [1].

The majority of patients with organic and symptomatic mental disorders that occur against the background of cerebrovascular pathology, marked cognitive and emotional disorders (CD and ED) of varying severity. Disorders of mental activity and negative psychological factors complicate the course of the disease, restoration and rehabilitation processes, become one of the main causes of temporary disability and disability of patients. Numerous studies have shown that more than 50% of cases of mild cognitive impairment pass into one or another variant of dementia [2].

A large number of interrelated indicators that characterize CD and ED, the analysis of which requires the use of mathematical methods and software, determined the need to develop an information system for detecting cognitive and emotional disorders in patients with DEP.

PROBLEM STATEMENT

Currently, a number of information systems are used in psychoneurological practice. To identify and determine the degree of severity of the CD, information system "TESTER" is intended [3], but it allows to forecast the further development of this disorder and does not take into account the possibility of patients having cerebrovascular diseases.

One of the computer systems for psycho-diagnostics is the SMOL-Expert system [4], which is based on the SMOL-test, designed for psychological counseling. The resources of this computer system allow for testing, processing results, maintaining a database and interpreting survey results. However, generation of a large number of variants of output of results, which the system issues, significantly complicates the diagnostic process and lowers its accuracy.

To determine the level of psychomotor development and control its dynamics in children, the expert system "Longitude" is used. It should be noted that the extended version of this system "Longitude +", which includes applied techniques, through which psychological work is carried out with adolescents and adults [5]. The disadvantage of this system is that it is designed to assess the condition of a conditionally healthy person, i.e. it does not allow to objectively assessing the mental state in patients with cerebrovascular diseases.

Automation of the process of conducting an outpatient card for patients in the psychiatric and narcological department can be carried out using the automated "Map of the patient who has applied for psychiatric care", which greatly facilitates the work of psychiatrists, especially young specialists [6], but it does not automate data analysis on the patient's condition, namely, to identify and determine the severity of ED and CD.

The "Aimedika" support system for making medical decisions (SSMMD) forms a list of the most likely diseases, based on the data of more than 22 million scientific articles on medical topics and the results of clinical practice in various medical specializations [7]. However, the disadvantage of this SSMMD, due to a rather impressive list of possible diseases, is the low accuracy of detecting and predicting cognitive and emotional disorders in patients with DEP.

The use of neural network systems is a justified and promising direction in predicting the development of the disease in patients with DEP, against the background of a large number of clinical parameters that are among themselves in a nonlinear connection. An example of this is the NeuroPro 0.25 hardware-software complex [8], which allows to forecast the development of a DEP based on the use of an artificial neural network. However, the diagnosis and prediction of this disease with the help of this complex is difficult.

Thus, the analysis of the existing MIS has shown that at present a number of known medical and psychological systems that allow to diagnose disorders of the emotional and cognitive spheres in a CVD chronic form, but they do not cover the entire specifics of these disorders, and accordingly they do not have high diagnostic accuracy.

The purpose of this work is to develop a medical information system for the detection of emotional and cognitive impairment in patients with discirculatory encephalopathy.

To achieve this aim, it is necessary to solve the following tasks:

- to develop a method for detecting emotional and cognitive impairment in patients with discirculatory encephalopathy;
- to develop a structural diagram of the medical information system that allows to identify emotional and cognitive impairments in patients with discirculatory encephalopathy, reflecting the work of all its modules.

MATERIALS AND METHODS OF RESEARCH

When developing the method for detecting ED and CD, the optimal sample size was determined. So, with a reliability level of $\gamma = 0.95$ and a maximum error of 5%, the required sample size was 236–350 people. For this study, a group of 350 patients aged 33 to 65 years was formed.

All patients underwent examination, which used clinico-psychopathological, clinical-anamnestic, psychodiagnostic, psychological, laboratory-diagnostic, instrumental methods [1]. Thus, 135 indicators were obtained reflecting the somatic and psychoemotional state of health of patients with DEP.

The article uses mathematical statistics methods for processing diagnostic information; methods of mathematical modeling for constructing mathematical models for detecting the probability of ED and detecting and determining the degree of severity of CD in patients with DEP; methodical bases of construction of information technologies in medicine when building an information system for detecting cognitive and emotional disorders in patients with discirculatory encephalopathy.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DETECTING EMOTIONAL AND COGNITIVE IMPAIRMENT IN PATIENTS WITH DEP

To analyze the development of DEP, it is necessary to perform a number of interrelated steps: determining the likelihood of occurrence of ED, identifying the impact vector for conducting psychic correction, identifying CD and determining their severity, predicting the further development of CD in patients with DEP.

Let there be some set of patients with DEP:

$$Q = \{q_j\},$$

where $j = \overline{1,m}$ — patient serial number.

Let there also be a finite set X of n possible indicators of the state of patients with DEP:

$$X = \{x_i\},$$

where $i = \overline{1,n}$ — state index number.

X is the union of two subsets:

$$X = X^{PSY} \cup X^{DIAG},$$

where X^{PSY} — subset of psychological indicators, X^{DIAG} — subset of somatic indices.

As the values of these parameters in the j-th patient are different, the subset of the values of the psychological state q_j of the patient is defined as $X_j^{PSY} \subset X_j$, $\left|\mathrm{X_j^{PSY}}\right|$=82, a subset of the values of the indicators of the somatic state as $X_j^{DIAG} \subset X_j$, $\left|\mathrm{X_j^{DIAG}}\right|$=53.

In determining the emotional status, depending on the indices X_j, each patient q_j can be attributed to one of two groups of a finite set $\mathrm{L} = \{\mathrm{l_v}\}$, where $v = \overline{1,2}$ — group number. So, l_1 — absence of ED, l_2 — presence of ED.

To assign q_j to one of the classes of a finite set L, it is necessary to construct a mathematical model defining the projection:

$$X_j \xrightarrow{P} L : \{q_j \in L_v | \mathrm{P}\},$$

where P — probability of the jth patient falling into one of the two groups.

In determining the cognitive status, depending on the indices X_j, each patient q_j might be attributed to one of the three groups of a finite set $\mathrm{B} = \{\mathrm{b_g}\}$, where $g = \overline{1,3}$ — group number. So, b_1 — absence of KH, b_2 — lungs KH, b_3 — moderate KH.

To assign q_j to one of the classes of the finite set B, it is necessary to construct a mathematical model defining the projection:

$$X_j \xrightarrow{F} B : \{q_j \in B_g | \mathrm{F}\},$$

where F — the values of the functions of the j-th patient in the g-th group.

Observations were made on m objects, each of which is characterized by the n-dimensional vector of features.

For each q_j, it is known that it belongs to one of the two groups l_1 or l_2, in addition, the same patient belongs to one of the three groups b_1, b_2 or b_3.

Thus, the task is as follows: to develop a method based on the model for identifying the probability of ED, allowing for the implementation $X_\mathrm{j} = (x_1, x_2, ..., x_n)$ newly admitted to the examination of the patient refer it to one of two groups l_1 or l_2, and the model, determining the degree of severity of CD, which allows the patient to be assigned to one of the three groups b_1, b_2 or b_3 for the realization of the same X_j.

The method of detecting emotional and cognitive impairment in patients with DEP consists of a number of stages.

At the first stage the data array was formed $X = \{X_{ij}\}$, where x_{ij} — the value of the ith indicator of the state of the jth patient.

At the second stage, all quantitative, nominal and ordinal indicators of the patient's condition were subject to normalization and coding.

To bring the selected indicators to a single scale, linear scaling formulas were used:

for indicators like "the less, the better":

$$\hat{x}_\mathrm{ij} = \frac{x_{ij} - x'_{min}}{x'_{max} - x'_{min}}; \quad (1)$$

for indicators like "the more, the better":

$$\hat{x}_\mathrm{ij} = \frac{x'_{max} - x_{ij}}{x'_{max} - x'_{min}}, \quad (2)$$

where $\hat{x}_\mathrm{ij}$ is the normalized ith index of the jth patient, x_{ij} is the eigenvalue of the ith parameter of the jth patient, x'_{min} and x'_{max} are respectively the minimum and maximum possible value of the indicator.

Thus, in this case, $\hat{x}_{ij} \in [0,1]$ the best state indices for the jth patient correspond to zero, and the worst for the unit.

The third stage of the method was the determination of the probability of ED on the basis of the logistic regression model [9].

The probability of occurrence of ED was determined by the formula:

$$P = \frac{e^d}{1+e^d}, \tag{3}$$

where d = -19,26 + 0,82 X_{1j} - 0,50 X_{2j} + 0,94 X_{3j} - 0,46 X_{4j} + 0,96 X_{5j} - 1,53 X_{6j} + + 1,60 X_{7j}, X_{1j} — trustfulness-suspicion, X_{2j} — straightforwardness-diplomacy, X_{3j} — level of fibrinogen, X_{4j} — anxiety, X_{5j} — depression, X_{6j} — psychosocial stress indicator and X_{7j} — blood glucose level [9].

At the fourth stage of the method, signs were identified that required priority correction.

Included in the mathematical model of determining the probability of occurrence of ED indicators were ranked and cut off those whose level was from 0 to 0.5.

$$\tilde{x}_{ij} = \left\{\hat{x}_{\text{ij}} \middle| \hat{x}_{\text{ij}} > 0{,}5\right\}, \tag{4}$$

where $\tilde{x}_{ij}$ — ranked indicator.

To determine the optimal set of features that require an initial correction, the product of the sensitivity of each feature β_i with its value $\tilde{x}_{ij}$ was calculated:

$$x^*_{\text{ij}} = \left(x^*_{1\text{j}}, x^*_{2\text{j}}, \ldots, x^*_{\text{nj}}\right),\ n = M\left(\tilde{x}_{ij}\right),$$

$$x^*_{\text{ij}} = \beta_i \cdot x_{ij}, \tag{5}$$

$$x^*_{\text{ij}} \le x^*_{\text{ij+1}},$$

where M — cardinality of the set of indices of the calculated exponents.

The calculated optimal vector of influence on the emotional state of the patient made it possible to conduct a psycho-correction quickly and qualitatively.

The fifth stage of the method was the identification and determination of the degree of severity of CD based on the construction of discriminant functions [1].

$$\begin{aligned} \text{F}_1(X) = {} & 4{,}61 + 1{,}65 \cdot A_{1j} + 1{,}32 \cdot A_{2j} + 1{,}67 \cdot A_{3j} - 0{,}24 \cdot A_{4j} + 1{,}42 \cdot A_{5j} - \\ & - 1{,}31 \cdot A_{6j} - 2{,}04 \cdot A_{7j} + 1{,}07 \cdot A_{8j} - 0{,}92 \cdot A_{9j} - 2{,}32 \cdot A_{10j} + 1{,}44 \cdot A_{11j} \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} \text{F}_2(X) = {} & -23{,}57 + 0{,}29 \cdot A_{1j} + 0{,}68 \cdot A_{2j} - 0{,}06 \cdot A_{3j} + 0{,}28 \cdot A_{4j} + 0{,}10 \cdot A_{5j} + \\ & + 0{,}57 \cdot A_{6j} + 1{,}77 \cdot A_{7j} - 0{,}53 \cdot A_{8j} - 0{,}14 \cdot A_{9j} + 1{,}25 \cdot A_{10j} - 0{,}75 \cdot A_{11j} \end{aligned} \tag{7}$$

where A_{1j} — stage of DEP, A_{2j} is the depression index, A_{3j} — anxiety index, A_{4j} — physical functioning, A_{5j} — probability of ED, A_{6j} — psychological health, A_{7j} — systolic pressure, A_{8j} — diastolic pressure, A_{9j} — number of red blood cells, A_{10j} — speed erythrocyte sedimentation, A_{11j} — prothrombin index, F_1 and F_2 — values of canonical discriminant functions [1].

At the sixth stage, a forecast is given for the further development of CD, using the Wald sequential analysis method [10].

After achieving the result of algebraic summation of the *DK* values of the threshold amount, which is ± 12.78 points, a favorable or unfavorable current is predicted CD [11].

At the seventh stage, a diagnostic conclusion is formed. Based on the calculated values of the probability of ED and discriminant functions, it is determined whether a particular patient belongs to one of the groups l_v and b_g.

DEVELOPMENT OF THE STRUCTURAL SCHEME OF MIS, ALLOWING TO IDENTIFY ED AND CD IN PATIENTS WITH DEP

The developed method is the basis for MIS, which allows to identify ED and CD in patients with DEP. This system is an independent software and hardware tool that allows in the dialog or batch mode to process information and get all the necessary input data in the form of screen or printed forms.

The structural diagram of the developed information system "CognitiveDE" for a psychiatrist (doctor-psychotherapist, medical psychologist) (Fig. 1) is a logically linked interaction of the biological and technical subsystems.

The collection of information about the patient's condition is carried out as a result of clinical, psycho-pathological, clinical-anamnestic, psychodiagnostic, laboratory-diagnostic and instrumental studies, using diagnostic and laboratory-analytical equipment. The received information enters the information input module, where the initial set is formed, which is transmitted to the information processing module.

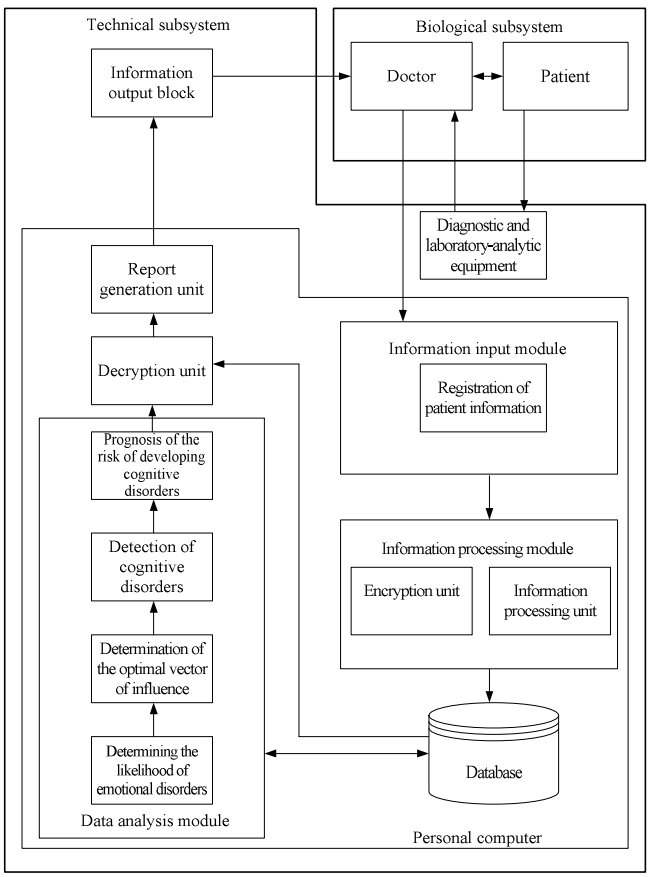

Fig. 1. Structural scheme of MIS of ED and CD detection

The information processing module encodes information about the patient's condition and encrypts its passport data. As the most effective algorithm for protecting information, a symmetric algorithm of block-based AES encryption was chosen, which allowed to ensure confidentiality and prevent violation of data integrity and distortion.

Further, the processed data falls into the database. The developed database is characterized by a large amount of textual and numerical information about the patient's somatic and psychic emotional state.

At the stage of conceptual database design, entities were identified, between which there are one-to-many relationships. At the stage of physical database design, a data schema model was developed.

The database developed is open and cross-platform, which allows us to speak about the universal organization of its structure for solving problems of automating the diagnostic process of similar diseases.

Then the data goes to the data analysis module, where on the basis of the developed method, CD and ED are detected in patients with DEP, and the results obtained in this module are stored in the database for storage.

Then, in the decryption unit, the patient's patient data is restored by inverse transformation, using the same AES algorithm.

Then the information goes to the report generation unit, after which an opinion is generated, which is passed on to the specialist for the final acceptance of the medical decision.

To work with the system, a convenient and easy-to-use interface has been developed that makes it possible to register patients in an accessible form, to enter the results of surveys, to conduct psychological testing, etc., which is important in the work of medical personnel (Fig. 2).

The developed MIS "CognitiveDE" was implemented using an object-oriented Java programming language using the MySQL database management system.

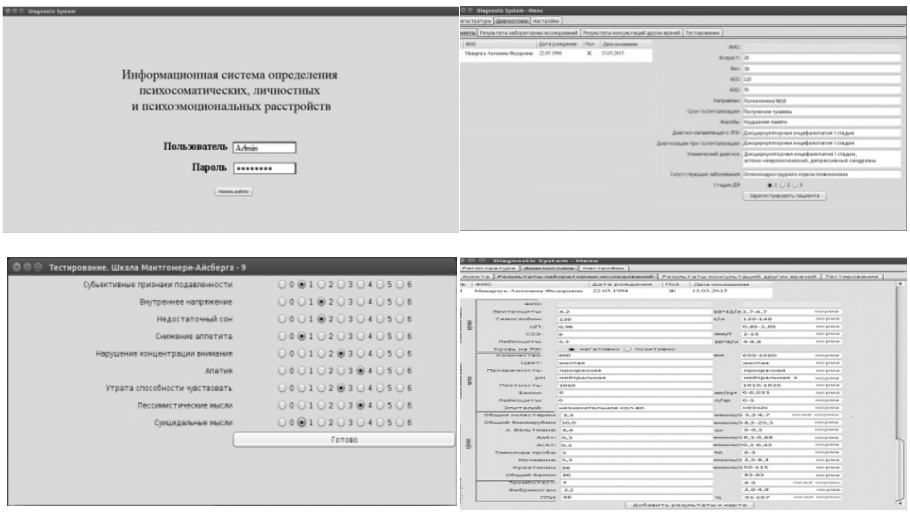

Fig. 2. Dialog windows of the "CognitiveDE" system

Table 1. **The results of the detection of emotional and cognitive impairment in patients with discirculatory encephalopathy**

n	T		V_1		V_2	
	n_1	%	n_1	%	n_1	%
175	3	5,08 ± 0,29	3	5,17 ± 0,30	2	3,45 ± 0,24

QUALITY CONTROL OF SOFTWARE DEVELOPED BY MIS

The usefulness of MIS "CognitiveDE" was tested in practice in the determination of emotional and cognitive impairment in 175 patients (n) with DEP who were hospitalized in the Kharkov Regional Clinical Psychiatric Hospital No. 3 (59 people made a test sample (T), and 116 — two validation samples (V_1 and V_2)), each patient underwent psychodiagnostic and laboratory-instrumental studies, in each of the samples a number of patients were identified who had erroneously detected emotional and/or cognitive impairments spheres (n_1) and percentage of these errors (%).

The results of detection of ED and CD, obtained with the help of the developed system "CognitiveDE", showed that 167 patients out of 175 had the correct violations of emotional and cognitive spheres (Table 1). The accuracy of these violations was 95.43 ± 0.16%.

The quality of the software MIS "CognitiveDE" was tested using the demo-version of the program JHAWK version 6.0.

For the system level, the average cyclomatic complexity for all AVCC classes was 1.13, which indicates a good result, because AVCC < 5 indicates a simple class [11]. The metric of the aggregate number of Halstead errors (HBUG) was tested, which showed the possibility of detecting a 3.52 error in the program code. This result indicates a quality software. Another important system metric is the program accompanying index (MI), the value of which is more than 100, which shows a high level of program maintenance [11].

Thus, the MIS has been developed to detect cognitive and emotional disorders in patients with DEP, which allows to improve the quality of diagnosis of CD and ED, and to reduce the time spent for this. The structural diagram of MIS "CognitiveDE" shows logically connected by interaction of biological and technical subsystems. The conducted testing of the system software showed its high quality.

CONCLUSIONS

We developed a method of detecting violations of the emotional and cognitive patients with circulatory encephalopathy, based on a mathematical model for determining the likelihood of emotional disorders, including such factors as: the credulity-suspicion, straightness-diplomacy, fibrinogen level, anxiety and depression, psychosocial stress index and the level of glucose in blood and correctly classifying l_v group with a probability of 0.949, and a mathematical model to identify and determine the degree of severity cognitive disorders consisting figures step circulatory encephalopathy, depression and anxiety, physical functioning, emotional disturbances probability, psychological health, systolic and diastolic blood pressure, red blood cell count, erythrocyte sedimentation rate, prothrombin index which correctly classifies b_g group with a probability of 0.973.

A structural diagram of the medical information system "CognitiveDE" has been developed, which determines the composition and purpose of its main modules, and has allowed to develop a methodological basis for describing the interaction of the elements of the biological and technical subsystems. Presented information system can be used by physicians of neurological and psychiatric offices and clinical psychologist to improve accuracy and reduce diagnosis time emotional and cognitive disorders.

The verification of software medical information "CognitiveDE" system which has shown compliance with the requirements of the results of the individual steps of the system development and limitations set forth for them was held.

REFERENCES

1. Vysotskaya E.V., Kozhina A.M., Risovanaya L.M., Chaika H.E. Application of discriminant analysis for the classification of cognitive disorders in patients with discirculatory encephalopathy. *Information processing system*, 2013, Vol. 9, pp. 189–193. (In Russian).
2. Kozhina A.M., Grigorova I.A., Korosty V.I. and others. Organic mental disorders due to somatic diseases: cognitive and emotional disorders. Kharkov: Ukraine Rarities, 2012, 120 p. (In Ukrainian).
3. Aleksandrovsky Y.A., Shchukin B.P. Psychological disorders during and after natural disasters and disasters. *Journal of Neuropathology and Psychiatry*, 1991, Vol. 5, pp. 39–43. (In Russian).
4. Bleicher V.M., Krook I.V., Bokov S.N. *Clinical Pathopsychology*. Moskow, 2002, 511 pp. (In Russian).
5. Miroshnikov S.A. Expert system Longitude. *The experimental and diagnostic complex (EDC)*. SPb: Lema, 2010, 196 pp. (In Russian)
6. Altamirov S.A. Application of information technology in the activities of a psychiatrist. *Young Scientis*, 2016, Vol. 29, pp. 200–203. (In Russian).
7. Aimedica. General information. http://aimedica.ru/info.jsp. (In Russian).
8. Kan L.V., Kuznetsova Y.M., Chudova N.V. Expert systems in the field of psychodiagnostics. *Artificial Intelligence and Decision Making*, 2010, Vol. 2, pp. 26–35. (In Russian).
9. Rysovana L., Vysotska O., Porvan A., Alekseenko R. Family crisis investigation on the basis of regression analysis. *The problems of empirical research in psychology and humanities: Roland Barthes VIII International Scientific Conference. Europejskie Studia Humanistyczne: państwo i społeczeństwo.* Krakow, 2016, Vol. 2, p. 83–91.
10. Nechaeva G.I., Achmedov V.A., Bereznikov A.V. and others. Methodical approaches to the expert evaluation of the quality of therapeutic care for chronic cholecystitis. *Therapeutic archive*, 2010, Vol. 1, pp. 12–15. (In Russian).
11. Watson A., McCabe T. Structured testing: a testing methodology using the cyclomatic complexity metric. URL: http://www.mccabe.com/pdf/mccabe-nist235r.pdf. (Last accessed: 10.11.2017) 1996.

Received 26.02.2018

ЛИТЕРАТУРА

1. Высоцкая Е.В., Кожина А.М., Рисованая Л.М., Чайка Е.Э. Применение дискриминантного анализа для классификации когнитивных расстройств у больных дисциркуляторной энцефалопатией. *Системи обробки інформації,* 2013, №9, с. 189–193.
2. Кожина А.М., Григорова І.А., Коростій В.І. и др. Органічні психічні розлади внаслідок соматичних захворювань: когнітивні та емоційні порушення. Х.: Раритети України, 2012, 120с.
3. Александровский Ю.А., Щукин Б.П. Психологические расстройства во время и после стихийных бедствий и катастроф. *Журнал невропатологии и психиатрии*, 1991, № 5, с. 39–43.

4. Блейхер В.М., Крук И.В., Боков С.Н. Клиническая патопсихология. М.:, 2002, 511 с.
5. Мирошников С.А. Экспертная система Лонгитюд. Экспериментально-диагностический комплекс (ЭДК). СПб.: Лема, 2010, 196 с.
6. Алтамиров С.А. Использование информационных технологий в деятельности врача-психиатра. *Молодой ученый*, 2016, № 29, с. 200–203.
7. Аймедика. Общая информация. *http://aimedica.ru/info.jsp*.
8. Кан Л.В., Кузнецова Ю.М., Чудова Н.В. Экспертные системы в области психодиагностики. *Искусственный интеллект и принятие решений*, 2010, № 2, с. 26–35.
9. Rysovana L., Vysotska O., Porvan A., Alekseenko R. Family crisis investigation on the basis of regression analysis. *The problems of empirical research in psychology and humanities: Roland Barthes VIII International Scientific Conference. Europejskie Studia Humanistyczne: państwo i społeczeństwo.* Krakow, 2016, № 2, p. 83–91.
10. Нечаева Г.И., Ахмедов В.А., Березников А.В. и др. Методические подходы к экспертной оценке качества терапевтической помощи при хронических холециститах. *Терапевтический архив*, 2010, № 1, с. 12–15.
11. Watson A., McCabe T. Structured testing: a testing methodology using the cyclomatic complexity metric. URL: http://www.mccabe.com/pdf/mccabe-nist235r.pdf. (Last accessed: 10.11.2017) 1996.

Получено 26.02.2018

Л.М. Рисованая[1], ассистент,
каф. медицинской и биологической физики
и медицинской информатики,
e-mail: rluba_24@ukr.net
Е.В. Высоцкая[2], д-р техн. наук, проф.,
проф. каф. информационных управляющих систем
e-mail: evisotska@ukr.net
[1] Харьковский национальный медицинский университет,
г. Харьков, пр. Науки, 4, 61022, Украина
[2] Харьковский национальный университет радиоэлектроники,
г. Харьков, пр. Науки, 14, 61166, Украина

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ВЫЯВЛЕНИЯ ЭМОЦИОНАЛЬНЫХ И КОГНИТИВНЫХ НАРУШЕНИЙ У ПАЦИЕНТОВ С ДИСЦИРКУЛЯТОРНОЙ ЭНЦЕФАЛОПАТИЕЙ

Введение. В современных условиях актуальными являются вопросы выявления эмоциональных и когнитивных нарушений на фоне цереброваскулярных заболеваний хронической формы. Большое количество взаимосвязанных показателей, характеризующих эмоциональные и когнитивные нарушения, анализ которых требует применения математических методов и программных средств, определило необходимость разработки информационной системы выявления эмоциональных и когнитивных нарушений у пациентов с дисциркуляторной энцефалопатией.

Цель — разработать медицинскую информационную систему выявления когнитивных и эмоциональных нарушений у пациентов с дисциркуляторной энцефалопатией, позволяющей повысить точность диагностики.

Материалы и методы. В статье использованы методы математической статистики, математического моделирования и построения информационных технологий в медицине.

Результаты. Разработан метод выявления нарушений эмоциональной и когнитивной сферы у пациентов с дисциркуляторной энцефалопатией, включающий определение вероятности возникновения эмоциональных нарушений, выявление вектора воздействия для проведения психокоррекции, выявление когнитивных нарушений и определение их степени тяжести, прогнозирование дальнейшего развития когнитивных нарушений. Разработана структурная схема информационной системы, определены состав и назначения ее основных модулей, что позволило разработать методическую

базу для описания взаимодействия элементов биологической и технической подсистем. Проведена оценка качества разработанного программного обеспечения медицинской информационной системы «CognitiveDE».

Выводы. Использование разработанной медицинской информационной системы «CognitiveDE» выявления когнитивных и эмоциональных нарушений у пациентов с дисциркуляторной энцефалопатией, в основу которой положен предложенный метод оценки дисциркуляторной энцефалопатии, позволяет повысить качество диагностики эмоциональных и когнитивных нарушений и сократить затрачиваемое для этого время.

Ключевые слова: *медицинская информационная система, метод оценки, когнитивные и эмоциональные нарушения, дисциркуляторная энцефалопатия*.

Л.М. Рисована, асистент,
каф. медичної та біологічної фізики і медичної інформатики
e-mail: rluba_24@ukr.net

О.В. Висоцька, д-р техн. наук, проф.,
проф. каф. інформаційних управляючих систем
e-mail: evisotska@ukr.net
[1] Харківський національний медичний університет,
пр. Науки, 4, м. Харків, 61022, Україна
[2] Харківський національний університет радіоелектроніки,
пр. Науки, 14, м. Харків, 61166, Україна

ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ВИЯВЛЕННЯ ЕМОЦІЙНИХ І КОГНІТИВНИХ ПОРУШЕНЬ У ХВОРИХ НА ДИСЦИРКУЛЯТОРНУ ЕНЦЕФАЛОПАТІЮ

Вступ. В сучасних умовах актуальними є питання виявлення емоційних і когнітивних порушень на тлі цереброваскулярних захворювань хронічної форми. Велика кількість взаємопов'язаних показників, які характеризують емоційні і когнітивні порушення, аналіз яких вимагає застосування математичних методів і програмних засобів, визначило необхідність розроблення інформаційної системи виявлення емоційних і когнітивних порушень у пацієнтів з дисциркуляторною енцефалопатією.

Мета. Розроблення медичної інформаційної системи виявлення когнітивних і емоційних порушень у пацієнтів з дисциркуляторною енцефалопатією, що дозволяє підвищити точність діагностики.

Результати. Розроблено метод виявлення порушень емоційної та когнітивної сфери у пацієнтів з дисциркуляторною енцефалопатією, який включає визначення ймовірності виникнення емоційних порушень, виявлення вектора впливу для проведення психокорекції, виявлення когнітивних порушень і визначення їх ступеня тяжкості, прогнозування подальшого розвитку когнітивних порушень. Розроблено структурну схему інформаційної системи, визначено склад і призначення її основних модулів, що дозволило розробити методичну базу для опису взаємодії елементів біологічної та технічної підсистем. Проведено оцінювання якості розробленого програмного забезпечення медичної інформаційної системи «CognitiveDE».

Висновки. Використання розробленої медичної інформаційної системи «CognitiveDE» виявлення когнітивних і емоційних порушень у пацієнтів з дисциркуляторною енцефалопатією, в основу якої покладено запропонований метод оцінювання дисциркуляторної енцефалопатії, дозволяє підвищити якість діагностики емоційних і когнітивних порушень і скоротити витрачений на це час.

Ключові слова: *медична інформаційна система, метод оцінювання, когнітивні та емоційні порушення, дисциркуляторна енцефалопатія.*

DOI: https://doi.org/10.15407/kvt192.02.084

УДК 602.9:611.018

С.М. ЗЛЕПКО[1], д-р. техн. наук, проф.,
зав. каф. біомедичної інженерії
e-mail: smzlepko@ukr.net
Т.А. ЧЕРНИШОВА[2], лікар
e-mail: tetyana.che@gmail.com
О.Е. МАЄВСЬКИЙ[3], д-р. мед. наук, проф.,
зав. каф. гістології
e-mail: maevskyalex8@gmail.com
В.Є. КРИВОНОСОВ[4], доц. каф. біомедичної інженерії
e-mail: yhtverf007@ukr.net
О.Ю. АЗАРХОВ[4], д-р. мед. наук, проф.,
зав. каф. біомедичної інженерії
e-mail: azarhov55@mail.ru
[1] Вінницький національний технічний університет,
Хмельницьке шосе, 95, 21021, м. Вінниця, Україна
[2] Медичний центр Національного авіаційного університету,
п-кт Космонавта Комарова, 1, 03058, м. Київ, Україна
[3] Вінницький національний медичний університет ім. М. Пирогова,
вул. Пирогова, 56, 21000, м. Вінниця, Україна
[4] Приазовський державний технічний університет,
вул. Університетська, 7, 87500, м. Маріуполь, Україна

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЦИРКУЛЮЮЧИХ ПУХЛИННИХ КЛІТИН В КРОВІ ЛЮДИНИ

Розроблення інформаційних систем і технологій оброблення медичних зображень клітин, отриманих у дослідженні гістологічних препаратів, є одним із найважливіших і пріоритетних напрямків сучасної медичної науки. Виявлення циркулюючих пухлинних клітин уразі різних локалізацій злоякісних новоутворень наразі є одним із актуальних питань в онкології. Відмінною особливістю циркулюючих пухлинних клітин є агресивний метастатичний потенціал, що дозволяє розглядати їх як основний механізм пухлинної прогресії. У статті наведено методи виявлення циркулюючих пухлинних клітин, проаналізовано сучасні методи та алгоритми оброблення і відновлення біомедичних зображень. Поетапно наведено роботу інформаційної технології визначення циркулюючих пухлинних клітин в крові людини. Здійснено порівняння розробленої технології та наявних аналогів. На відміну від наявних аналогів, розроблена технологія виявляє циркулюючі пухлинні клітини з діаметром 4 мкм у дослідженні зразків крові пацієнтів з мілкоклітинним раком легенів.

***Ключові слова**: інформаційна технологія, циркулююча пухлинна клітина, медичне зображення, гістологія, оброблення, визначення, критерій.*

ЗЛЕПКО С.М., ЧЕРНИШОВА Т.А., МАЄВСЬКИЙ О.Е., КРИВОНОСОВ В.Є., АЗАРХОВ О.Ю., 2018

ВСТУП

Розроблення інформаційних систем і технологій оброблення медичних зображень клітин, отриманих у дослідженні гістологічних препаратів, є одним із найважливіших і пріоритетних напрямків сучасної медичної науки. Використання мікроскопічних зображень ракових клітин має велике значення для виявлення злоякісних і ракових клітин, визначення морфологічних змін клітин, їх ідентифікації і підрахунку. Це зумовило той факт, що саме процедура автоматичного підрахунку кількості ядер клітин є ключовим моментом у створенні систем і технологій, орієнтованих на аналіз медичних зображень гістологічних препаратів [1].

Виявлення циркулюючих пухлинних клітин (ЦПК) за різних локалізацій злоякісних новоутворень в теперішній час є одним з актуальних питань в онкології. Відмінною особливістю ЦПК є агресивний метастатичний потенціал, набутий в результаті еволюції клона, що дозволяє розглядати їх як основний механізм пухлинної прогресії. Вивчення біологічних характеристик ЦПК, на відміну від більшості інших злоякісних клітин, які є в первинній пухлині, дозволило говорити про принципово нові онкомаркери, що мають високе прогностичне значення [1, 2].

В теперішній час ЦПК в крові у хворих раннім раком (NO) молочної залози виявляється в 30% випадків, у хворих місцево розповсюдженим раком (N+) — в 36%, у хворих метастатичним раком — в 70% випадків [2].

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Проблема виявлення і розпізнавання ЦПК набула своєї актуальності в останні декілька десятиліть. На сьогодні є більш ніж 40 методів і засобів, орієнтованих на вирішення проблеми ЦПК, однак абсолютна більшість з них ще далека від своєї реалізації. Найбільшого поширення отримали п’ять методів, систем і технологій (рис. 1), які дозволяють виявити або підтвердити наявність циркулюючих пухлинних клітин в крові людини, що свідчить про придбання пухлиною нових якостей — інвазивності і здатності до метастазування, що може слугувати новим прогностичним маркером, який відображає ефективність припухлинного лікування [3, 5, 7].

Оптимізувати процес отримання високоінформативних та якісних біомедичних зображень дозволяє класифікація методів та апаратів, в якій, на наш погляд, надано: а) найбільш поширені методи; б) методи, оптимальні за структурою та ефективністю; в) методи, які забезпечені потужною математичною підтримкою; г) методи, що максимально відповідають критерію оптимальності (рис. 2) [8].

Метод ISET, що дозволяє виділяти неушкоджені ЦПК, є єдиним клінічно перевіреним методом для цитопатологічної діагностики ЦПК за звичайними цитопатологічними критеріями, які застосовуються лікарями-цитологами для оцінювання мазка за Папаніколау або у разі тонкоголковой біопсії [5]. Цю особливість ISET підтверджено в дослідженні за участю десяти цитопатологів, які наосліп проаналізували кров 770-ти пацієнтів, оброблену ISET методом, включаючи 569-ть хворих різними типами раку і 201 суб'єкта без раку [9]. Крім того, ISET має набагато вищу чутливість,

ніж інші методи ізоляції пухлинних мікроембол (ЦПМ) або кластерів, що складаються з декількох ЦПК. Вважають, що присутність ЦПМ корелює з поганим прогнозом. Сама здатність ISET виділяти і кількісно оцінювати ЦПК і ЦПМ крові дозволила ввести в практику термін «Циркулюючі пухлинні мікроемболи» [10, 11, 12].

Кілька незалежних команд порівняли ISET з CellSearch у пацієнтів з мілкоклітинним раком легенів, раком молочної залози, раком простати, меланомою і раком підшлункової залози і показали, що ISET значно більш чутливий метод, ніж CellSearch [7, 13].

Мета роботи полягає у підвищенні точності, чутливості і специфічності процесу виділення та визначення ЦПК в крові людини шляхом створення відповідної інформаційної технології.

Вивчення ЦПК, ймовірно, принесе значну клінічну та економічну користь завдяки можливості неінвазивної діагностики по крові у пацієнтів, яким потрібна таргетна терапія. Однак слід пам'ятати, що нові діагностичні методики можуть слугувати також і джерелами терапевтичних помилок та необґрунтованих витрат. Метод ISET розроблено спеціально для діагностичного виявлення ЦПК та їх подальшого аналізу. У цьому контексті необхідно підкреслити, що виділення ЦПК, можливо, дозволить неінвазивно визначати рецидиви раку на ранній стадії. Застосування методик з високою пропускною здатністю і можливістю характеризувати виділені в кровотоці ЦПК дозволить впроваджувати неінвазивні біомаркери для персоніфікованої і ефективної медичної допомоги в найближчому майбутньому [4].

РЕЗУЛЬТАТИ

Технологія виділення ЦПК за розміром (ISET) з вакуумною фільтрацією передбачає фільтрацію крові пацієнтів через полікарбонатну мембрану з заданими розмірами пор (ISET-Isolation by Size of Tumor cells). Після фільтрації і відповідного оброблення мембрани лікар отримує зразок клітинного препарату. Для підтвердження злоякісності пухлини необхідна наявність не менше 4-х критеріїв із 5-ти, які прийняті: анізонуклеоз (співвідношення > 0,5); розмір ядра клітини більше 16 мкм в діаметрі; нерегулярність ядерного контуру: наявність клітинних комплексів; високе ядерно-цитоплазматичне відношення (ЯЦВ), яке визначається за формулою [14, 15]:

$$\text{ЯЦВ} = S_{\text{я}} / S_{\text{ц}},$$

де $S_{\text{я}}$ — площа ядра; $S_{\text{ц}}$ — площа цитоплазми клітини.

Більшість виявлених ЦПК крупніші за розміром, ніж звичайні клітини крові, і експресують на своїй поверхні епітеліальні молекули клітинної адгезії (EpCAM), яка є специфічним для ракових клітин маркером, що найбільше використовується для виявлення ЦПК [15].

Відмінність запропонованого методу виділення, оцінювання та визначення цілісних і неушкоджених ЦПК полягає в доповненні його структури новими етапами (режимами), а саме: режимом 100% герметизації камери з гемолізатом і забезпеченні в ній необхідного і постійного тиску протягом всього процесу фільтрації і режимом трирівневої фільтрації ЦПК на послідовно розміщених полікарбонатних мембранах з діаметрами мікропор 8, 5 і 3 мкм.

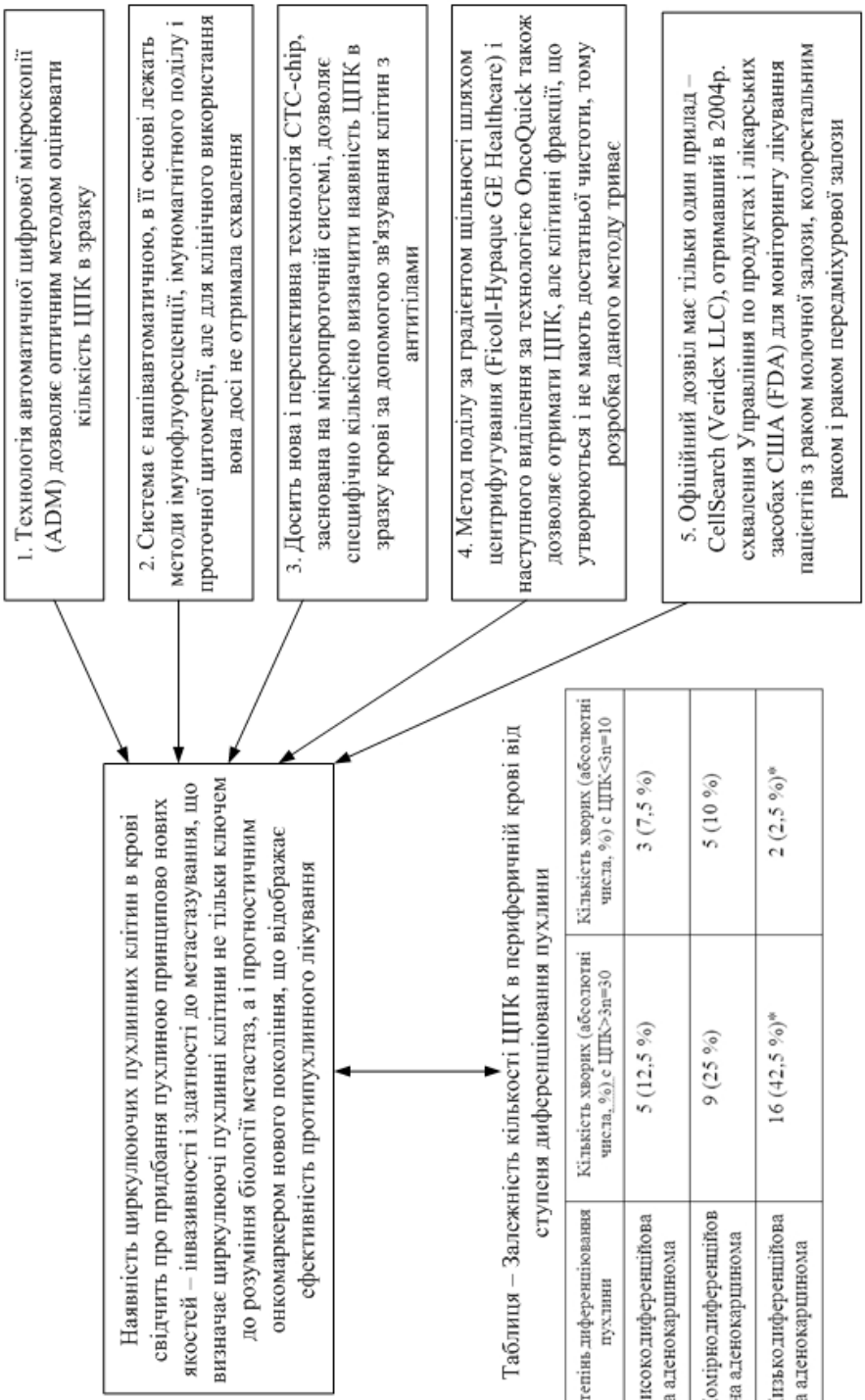

Рис. 1. Методи виявлення ЦПК [3, 4, 5, 6, 7]

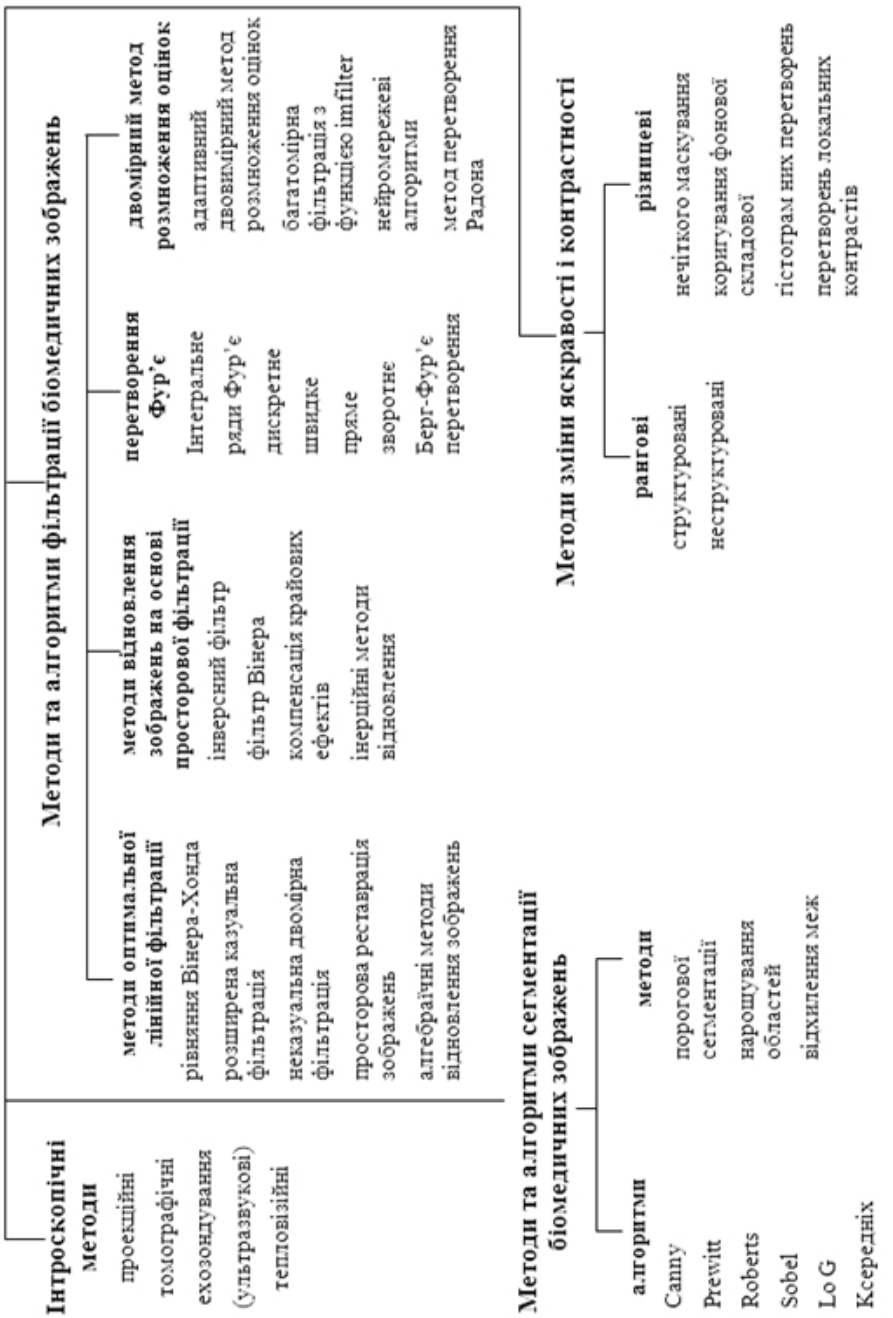

Рис. 2. Сучасні методи та алгоритми оброблення і відновлення біомедичних зображень [8]

Таким чином, незалежно від своїх розмірів, будуть затримані ЦПК, розмір яких не перевищує 3 мкм (на сьогодні такі ЦПК дослідникам не відомі).

Запропонований авторами метод оброблення мікроскопічних зображень ЦПК побудовано за принципом «від зворотнього» і принципом скринінгового сканування, має логічно-послідовну структуру, відповідно до якої перший етап методу передбачає встановлення розміру вікна сканування для зображення ЦПК таким, що не перевищує діаметр монокуляра мікроскопа, а процес оброблення набуває поступово-послідовного характеру з програмованим кроком переміщення предметного столика з розміщеними на ньому полікарбонатними мембранами з діаметрами мікропор 8, 5 і 3 мкм і подальшим, поетапним критеріальним визначенням ЦПК на кожній з мембран, що суттєво підвищує достовірність дослідження, скорочує його час та збільшує у рази пропускну здатність лікувально-діагностичних закладів під час проведення скринінгових оглядів населення.

Третій етап запропонованого методу можна вважати ключовим, тому що саме на цому етапі і визначаються ЦПК за відповідним алгоритмом, якщо ці клітини є у крові хворого.

Як було зазначено, основу апаратного забезпечення технології складає підсистема для фільтрації крові, яка має суттєві переваги перед аналогічними, а саме: герметизація камери з гемолізатом і забезпечення в ній постійного і незмінного тиску дозволяють уникати втрат і пошкоджень ЦПК з одного боку, а з іншого — виключають суб'єктивний вплив з боку лікаря на процес фільтрації: використання трьох полікарбонатних фільтрів з діаметрами пор 3, 5, 8 мкм для фільтрації крові суттєво розширює діагностичний діапазон розробленої технології, дозволяючи діагностувати також мілко клітинний рак легенів з ЦПК розміром 4 мкм.

Особливістю розробленої технології є введення до її структури підсистеми «інтелектуального» оброблення зображень ЦПК, яка фактично виконує функції підсистеми підтримки прийняття рішень і забезпечує практично 100-відсоткову відповідність поставленого діагнозу реальній ситуації, виключивши неоднозначність в його інтерпретації. Це досягається блоками моделювання зображень, визначення параметрів ЦПК, постановки діагнозу (прийняття рішень) і блоку формалізації експертних знань, в якому формується початкова структура предметної області, моделі ЦПК, алгоритми функціонування бази знань (БЗ). Блок формалізації виконує також процедури ранжування та узгодження експертних знань, орієнтованих на досягнення адекватного рішення. Ще однією особливістю підсистеми «інтелектуального» оброблення зображень є наявність структурованої бази даних, яка функціонує за керуванням СКБД MySQL і включає бази даних еталонних зображень, еталонних параметрів ЦПК, діагнозів, критеріїв оцінювання діагнозу та інші.

Структурну схему розробленої інформаційної технології (рис. 3, 4) надано у вигляді логічної послідовності 3-х етапів: I — отримання гемолізату для виявлення ЦПК; II — отримання мікроскопічних зображень і виділення ЦПК, і III — оброблення зображень, визначення ЦПК і прийняття діагностичних рішень.

Критеріальне оцінювання розробленої технології проводилась за трьома групами критеріїв: за модифікованою схемою P. Scarft, H. Bloom,

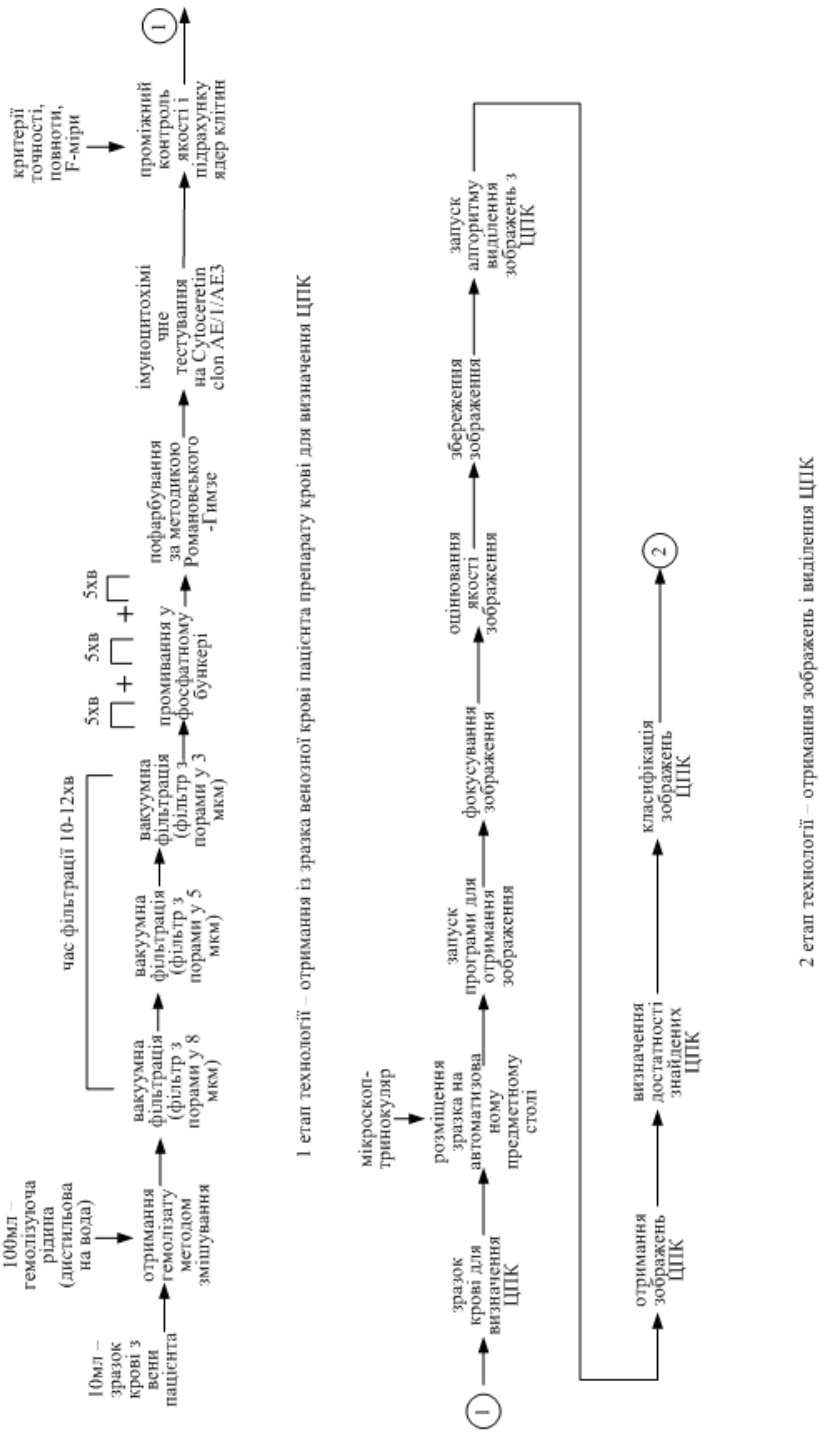

Рис. 3. Інформаційна технологія визначення циркулюючих пухлинних клітин в крові людини — 1, 2 етап

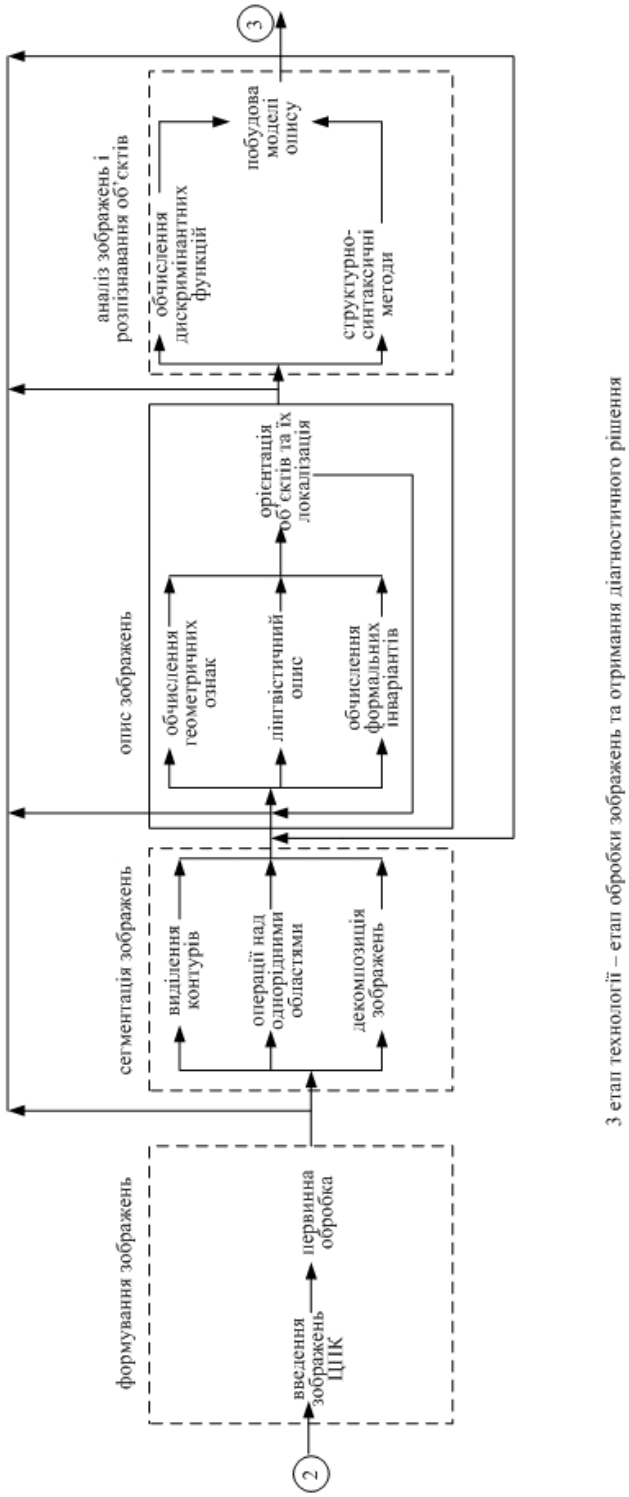

Рис. 4. Інформаційна технологія визначення циркулюючих пухлинних клітин в крові людини — 3 етап

W. Richardson [16], за методом ISET і за критеріями доказової медицини: специфічністю, точністю, чутливістю, прогностичною цінністю, повнотою та F-мірою (табл. 1) [17]:

Проведення порівняльного аналізу розробленої інформаційної технології визначення циркулюючих пухлинних клітин є досить складним процесом, зумовленим специфікою кожної системи, технології і методу, що зводить до мінімуму ту кількість можливих критеріїв, за якими можна порівняти наявні системи. Друга причина полягає в тому, що станом на цей час офіційний дозвіл на клінічне застосування має в світі тільки одна система CellSearch компанії Veridex (США), всі інші носять експериментальний характер і знаходяться на різних стадіях апробації і клінічних випробувань.

До таких систем і приладів можна віднести системи Ariol, MACS, RosseteSep, CIBER та інші. Зрозуміло, що на цому етапі отримати дані про технічні, експлуатаційні або клінічні параметри цих системи дуже складно, а іноді і неможливо. Третю причину пов'язано з тим, що розроблено системи, такі як «Контур», «Біоскан» (Білорусь, Росія), оптико-електронні інформаційні технології і системи (Україна), які працюють з попередньо отриманим і обробленим зображенням досліджуваного зразка крові [18–21].

Наявність зазначених причин та інших складнощів, що мають місце під час вибору інформативних критеріїв для проведення порівняльного аналізу, зумовила можливість розглядати поставлену задачу як класифікаційну, розв'язком якої є отримання простору інформативних критеріїв порівняльного аналізу розробленої та інших технологій і систем. До такого простору критеріїв увійшли: назва, фірма розробника і країна; метод, підхід, що покладено в основу системи, технології або принцип дії; кількість рівнів фільтрації ЦПК за допомоги мембран з діаметром пор 8, 5, 3 мкм; режим роботи — автоматичний (А), напівавтоматичний (Н/А), ручний (Р); час аналізу та оброблення одного зразка крові; рівень збереженості цільності та неушкодженості ЦПК — (В — високий, В/С — вище середнього, С — середній, Н/С — нижче середнього, Н — низький); чутливість методу у відсотках, яку наведено для різних типів раку — немілкоклітинного раку легенів, раку передміхурової залози, раку молочної залози, раку підшлункової залози; середня кількість ЦПК в 7,5 мл крові (в залежності від типу раку; середня кількість епітеліальних клітин в 7,5 мл крові (також в залежності від типу раку)) (табл. 2).

Таблиця 1. **Критерії доказової медицини**

Критерій	Інформаційна технологія	Методика М.Лукашевич і В.Старовойтова	Wiennert	Al-Kafahi
Точність	0,9312 ± 0,0343	0,8363 ± 0,0120	0,908 ± 0,04	0,707 ± 0,13
Повнота	0,9732 ± 0,0117	0,9570 ± 0,0016	0,859 ± 0,04	0,916 ± 0,04
F-міра	0,9138	0,8926	0,8828	0,7980

Таблиця 2. **Порівняльна таблиця характеристик інформаційної технології визначення циркулюючих клітин (ІТВЦК) та сучасних аналогів**

№ п/п	Назва, тип, фірма-виробник	Метод, підхід, принцип дії	Кількість рівнів фільтрації і діаметр пор мембрани	Режим роботи	Час аналізу і оброблення	Збереження цілісності і непошкодженості ЦПК	Чутливість методу, %	Середня кількість ЦПК в 7,5 мл крові	Середня кількість епітеліальних клітин
1	Система CellSearch, Компанія Veridex, США	Методи: імунофлуоресценції; імуномагнітного поділу; проточної цитометрії	не вказано	П/А	не вказано	С	від 21% до 90%	не вказано	від 0 до 8
2	ISET, США	Метод ізоляції за розміром пухлинних клітин	1 рівень, діаметр пор – 8 мкм	П/А	15 хв	В/С	від 50% до 100%	від 2 до 128	не вказано
3	Технологія CTC-chip, США	Метод проточної цитометрії	-	П/А		С	99%	не вказано	не вказано
4	Технологія Onco-Quick, США	Метод Ficoll-Hypague GE Healthcare	-	А	не вказано	С	не вказано	-	від 1 до 7
5	ІТВЦК, Україна	Удосконалений метод ізоляції за розміром пухлинних клітин	3 рівні фільтрації з діаметром пор 8, 5, 3 мкм і 100% герметика	А	до 30 хв (від забору крові до отримання кількості ЦПК і їхніх параметрів)	В	від 60% до 100%		від 0 до 10

Результат порівняння свідчить про те, що розроблена інформаційна технологія визначення ЦПК відповідає світовому рівню за всіма критеріями і вимогами.

ВИСНОВКИ

На відміну від наявних аналогів, розроблена технологія виявляє циркулюючі пухлинні клітини з діаметром 4 мкм у дослідженні зразків крові пацієнтів з мілкоклітинним раком легенів. Лікар, таким чином, отримав технологію автоматичного визначення ЦПК в периферичній або венозній крові з високою достовірністю та інформативністю, максимальним збереженням цілісності і неушкодженості циркулюючих пухлинних клітин. Проведений аналіз літературних джерел і власні клінічні дослідження підтвердили, що тільки технології на основі ISET методу дозволяють визначати циркулюючі трофобластні клітини плоду з крові матері, частота трапляння яких дуже мала.

ЛІТЕРАТУРА

1. М.М. Лукашевич, В.В. Старовойтов. Методика подсчета числа ядер клеток на медицинских гистологических изображениях. *Системный анализ и прикладная информатика*. 2016. №2. С. 37–42. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-podscheta-chisla-yader-kletok-na-meditsinskih-gistologicheskih-izobrazheniyah (Last accessed: 15.05.2018.)
2. Определение содержания ЦОК в периферической крови у больных с первично-генерализованным раком молочной железы на этапах лечения. URL: https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=22788 (Last accessed: 15.05.2018)
3. Kagan M., Howard D., Bendele T., Mayes J., Silvia J., Repollet M., Doyle J. A Sample Prepa ration and Analysis System for Identification of Circulating Tumor Cells. *Journal of Clinical Ligand Assay*. 2002. V. 25, N 1. P. 104–110.
4. Vona G., Sabile A., Louha M., Sitruk V., Romana S., Schutze K., Capron F. Isolation by size of epithelial tumor cells?: a new method for the immunomorphological and molecular characterization of circulatingtumor cells. *The American journal of pathology*. 2000. V. 156, N 1. P. 57–63.
5. Hayes G., Busch R., Voogt J., Siah I., Gee T., Hellerstein M., Chiorazzi N. Isolation of malignant B cells from patients with chronic lymphocytic leukemia (CLL) for analysis of cell proliferation: validation of a simplified method suitable for multi-center clinical studies. *Leukemia research*. 2010. V. 34, N 6. P. 809–815.
6. Павлов А.Ю., Гафанов Р.А., Цибульский А.Д., Фастовец С.В., Кравцов И.Б., Исаев Т.К. Роль оценки циркулирующих опухолевых клеток при раке простаты: диагностика и динамическое наблюдение. *РМЖ*. 2016. №8. С. 480–487.
7. Cell Search. URL: https://www.cellsearchctc.com/ (Last accessed: 25.04.2018)
8. Бабюк Н.П. Метод та система оцінювання динамічних змін біомедичних зображень в офтальмології, автореф. дис. … канд.техн.наук. Вінниця, ВНТУ, 2016, 24 с.
9. Hou J.M., Krebs M.G., Lancashire L., Sloane R., Backen A., Swain R.K. Clinical significance and molecular characteristics of circulating tumor cells and circulating tumor microemboli in patients with small-cell lung cancer. *J Clin Oncol*. 2012. No. 30(5). P. 525–532.
10. Ma Y.C., Wang L., Yu P.L. Recent Advances and Prospects in the Isolation by Size of Epithelial Tumor Ceils (ISET) Methodology. *Technol Cancer Res Treat*. 2012. No. f 2(4). P. 295–309.
11. Farace F., Massard C., Vimond N., Drusch F., Jacques N., Billiot F. A direct comparison of CellSearch and ISET for circulating tumour-cell detection in patients with metastatic carcinomas. *Br J Cancer*. 2011. No. 105(6), P. 847–853.

12. Mouawia H, SakerA, Jais JP, Benachi A, Bussieres L, LacourB,el al. Circulating trophoblastic cells provide genetic diagnosis in 63 fetuses at risk for cystic fibrosis or spinal muscular atrophy. *Reprod Blamed Online*. 2012. No.25(5). P. 503–520.
13. Бурденюк І.І. Інформаційна технологія для підтримки прийняття рішень при аналізі біомедичних даних. Автореф. дис. … дис. канд.техн.наук, Вінниця, ВНТУ, 2010. — 19 с.
14. Исмаилова Г. Laget S., Paterlini-Brechot P. Диагностика циркулирующих опухолевых клеток с помощью технологии ISET и их молекулярная характеристика для жидкостной биопсии. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/diagnostika-tsirkuliruyuschih-opuholevyh-kletok-s-pomoschyu-tehnologii-iset-i-ih-molekulyarnaya-harakteristika-dlya-zhidkostnoy. (Last accessed: 13.05.2018)
15. Ледов В.К., Скринникова М.А., Попова О.П. Выделение циркулирующих опухолевых клеток методом «изоляции по размеру» (ISET) (обзор). *Вопр. онкологии*. 2014. № 60(5). С. 548–552.
16. Цитологическая диагностика рака молочной железы. URL: http://mastopatia.com/tsitologicheskaya-diagnostika-raka-molochnoy-zhelezi.html (Last accessed: 20.05.2018.)
17. Чувствительность и специфичность диагностического исследования. URL: http://www.ebm.org.ua/clinical-epidemiology/testing/sensitivity-specificity/ (Last accessed: 20.05.2018.)
18. Медовый В.С., Пятницкий А.М., Соколинский Б.З. Инновационный проект «Разработка комплекса автоматизированной микроскопии, его облачного функционала, интернет-ресурса лабораторной телемедицины для медицинских анализов биоматериалов (МЕКОС-ЦЗ)». *Инноватика и експертиза*. Вып. 2(9). 2012. С. 50–64.
19. Абламейко С.В., Недзьведь А.М. Обработка оптических изображений клеточных структур в медицине. Минск, 2005. 156 с.
20. Чернишова Т.А, Злепко С.М., Тимчик С.В., Кривоносов В.Є., Злепко О.С. Інформаційна система для отримання та оброблення мікроскопічних зображень циркулюючих пухлинних клітин (ЦПК). *Здобутки клінічної та експериментальної медицини*. 2017. № 4 (32) С. 39–46
21. Чернишова Т. А., Злепко С.М., Азархов О.Ю., Данилков С.О., Кривоносов В.Є. Інформаційні технології і системи для ранньої діагностики онкологічних захворювань за рівнем циркулюючих пухлинних клітин. *Медична інформатика та інженерія*. 2017. № 4 (40). С. 30–35.

Отримано 03.04.2018

REFERENCES

1. Lukashevich M.M., Starovoytov V.V. Method of counting the number of cell nuclei on medical histological images. System analysis and applied informatics. 2016. № 2. P. 37–42. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-podscheta-chisla-yader-kletok-na-meditsinskih-gistologicheskih-izobrazheniyah (Last accessed: 15.05.2018) (in Russian).
2. Determination of CSC content in peripheral blood in patients with primary generalized breast cancer at the treatment stages. URL: https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=22788 (Last accessed: 15.05.2018) (in Russian).
3. Kagan M., Howard D., Bendele T., Mayes J., Silvia J., Repollet M., Doyle J. A Sample Preparation and Analysis System for Identification of Circulating Tumor Cells. *Journal of Clinical Ligand Assay*. 2002. V. 25, N 1. P. 104–110.
4. Vona G., Sabile A., Louha M., Sitruk V., Romana S., Schutze K., Capron F. Isolation by size of epithelial tumor cells?: a new method for the immunomorphological and molecular characterization of circulatingtumor cells. *The American journal of pathology*. 2000. V. 156, N 1. P. 57–63.
5. Hayes G., Busch R., Voogt J., Siah I., Gee T., Hellerstein M., Chiorazzi N. Isolation of malignant B cells from patients with chronic lymphocytic leukemia (CLL) for analysis of cell proliferation: validation of a simplified method suitable for multi-center clinical studies. *Leukemia research*. 2010. V. 34, N 6. P. 809–815.

6. Pavlov A.Yu., Gafanov R.A., Tsibulskiy A.D., Fastovets S.V., Kravtsov I.B., Isaev T.K. The role of evaluation of circulating tumor cells in prostate cancer: diagnosis and dynamic observation. *RMJ*. 2016. № 8. P. 480–487. (in Russian).
7. Cell Search. URL: https://www.cellsearchctc.com/ (Last accessed: 25.04.2018)
8. Babyuk N.P. Method and system of estimation of dynamic changes of biomedical images in ophthalmology. Thesis, PhD (Engineering), Vinnitsia, VNTU, 2016, 24 p. (in Ukrainian).
9. Hou JM, Krebs MG, Lancashire L, Sloane R, Backen A, Swain RK, ct al. Clinical significance and molecular characteristics of circulating tumor cells and circulating tumor microemboli in patients with small-cell lung cancer. *J Clin Oncol*. 2012. No. 30(5). P. 525–532.
10. Ma YC, Wang L, Yu PL. Recent Advances and Prospects in the Isolation by Size of Epithelial Tumor Ceils (ISET) Methodology. *Technol Cancer Res Treat*. 2012. No. f 2(4). P. 295–309.
11. Farace F, Massard C, Vimond N, Drusch F, Jacques N, Billiot F, el al. A direct comparison of CellSearch and ISET for circulating tumour-cell detection in patients with metastatic carcinomas. *Br J Cancer*. 2011. No. 105(6). P. 847–853.
12. Mouawia H, SakerA, Jais JP, Benachi A, Bussieres L, LacourB,el al. Circulating trophoblastic cells provide genetic diagnosis in 63 fetuses at risk for cystic fibrosis or spinal muscular atrophy. *Reprod Blamed Online*. 2012. No. 25(5). P. 503–520.
13. Burdenyuk I.I. Information technology for decision-making support in the analysis of biomedical data. Thesis, PhD (Engineering), Vinnitsia, VNTU, 2010. — 19 p. (in Ukrainian).
14. Ismailova G., Laget S., Paterlini-Brechot P. Diagnosis of circulatig tumor cells using ISET technology and their molecular characteristics for fluid biopsy: URL: https://cyberleninka.ru/article/n/diagnostika-tsirkuliruyuschih-opuholevyh-kletok-s-pomoschyu-tehnologii-iset-i-ih-molekulyarnaya-harakteristika-dlya-zhidkostnoy. (Last accessed: 13.05.2018) (in Russian).
15. Ledov V.K., Skrinnikova M.A., Popova O.P. Isolation of circulating tumor cells by isolated size (ISET) (Overview). *Vice versa oncology*. 2014. № 60(5). P. 548–552. (in Russian).
16. Cytological diagnosis of breast cancer URL: http://mastopatia.com/tsitologicheskaya-diagnostika-raka-molochnoy-zhelezi.html (Last accessed: 20.05.2018) (in Russian).
17. Sensitivity and specificity of diagnostic research URL: http://www.ebm.org.ua/clinical-epidemiology/testing/sensitivity-specificity/ (Last accessed: 20.05.2018) (in Russian).
18. Medovyiy V.S., Pyatnitskiy A.M., Sokolinskiy B.Z. Innovative project Development of a complex of automated microscopy, its cloud functional, Internet resource of laboratory telemedicine for medical analysis of biomaterials (MECOS-CZ). *Innovation and examination*. Is. 2(9), 2012, s. 50–64. (in Russian).
19. Ablameyko S.V., Nedzved A.M. Processing of optical images of cellular structures in medicine. Minsk, 2005. 156 p. (in Russian).
20. Chernyshova T.A, Zlepko S.M., Timchik S.V., Krivonosov V.Ye., Zlepko O.S. Information system for obtaining and processing microscopic images of circulating tumor cells (CPC). *Achievements of clinical and experimental medicine*. 2017. № 4 (32). P. 39–46.
21. Chernishova T.A., Zlepko S.M., Azarkhov O.Yu., Danilkov S.O., Krivonosov V.Ye., Baranovskyi D.M. Medical informatics and engineering sciences. *Pract. Journal* 2017. № 4 (40). P. 30–35. (in Ukrainian).

Received 03.04.2018

С.М. Злепко[1], д-р. техн. наук, проф.,
зав. каф. биомедицинской инженерии
e-mail: smzlepko@ukr.net
Т.А. Чернышева[2], врач
e-mail: tetyana.che@gmail.com
О.Е. Маевский[3], д-р. мед. наук, проф.,
зав. каф. гистологии,
e-mail: maevskyalex8@gmail.com
В.Е. Кривоносов[4], доцент
каф. биомедицинской инженерии
e-mail: yhtverf007@ukr.net
О.Ю. Азархов[4], д-р. мед. наук, проф.,
зав. каф. биомедицинской инженерии
e-mail: azarhov55@mail.ru
[1] Винницкий национальный технический университет,
Хмельницькое шоссе, 95, 21021, г. Винница, Украина
[2] Медицинский центр Национального авиационного университета,
п-кт Космонавта Комарова, 1, 03058, м. Киев, Украина
[3] Винницкий национальный медицинский университет им. Н. Пирогова,
ул. Пирогова, 56, 21000, г. Винница, Украина
[4] Приазовский государственный технический университет,
ул. Университетская, 7, 87500, г. Мариуполь, Украина

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦИРКУЛИРУЮЩИХ ОПУХОЛЕВЫХ КЛЕТОК В КРОВИ ЧЕЛОВЕКА

Разработка информационных систем и технологий обработки медицинских изображений клеток, полученных при исследовании гистологических препаратов, является одним из важнейших и приоритетных направлений современной медицинской науки. Выявление циркулирующих опухолевых клеток при различных локализациях злокачественных новообразований в настоящее время является одним из актуальных вопросов в онкологии. Отличительной особенностью циркулирующих опухолевых клеток является агрессивный метастатический потенциал, позволяющий рассматривать их как основной механизм опухолевой прогрессии. В статье приведены методы выявления опухолевых клеток, проанализированы современные методы и алгоритмы обработки и восстановления биомедицинских изображений. Поэтапно приведена работа информационной технологии определения циркулирующих опухолевых клеток в крови человека. Проведено сравнение разработанной технологии и существующих аналогов. В отличие от имеющихся аналогов, разработанная технология обнаруживает циркулирующие опухолевые клетки с диаметром 4 мкм в исследовании образцов крови пациентов с мелкоклеточным раком легких.

Ключевые слова: *информационная технология, циркулирующая опухолевая клетка, медицинское изображение, гистология, обработка, определение, критерий.*

S.M. Zlepko[1], D.Sc. (Engineering), Professor,
Head of the Department of Biomedical Engineering
e-mail: smzlepko@ukr.net
T.A. Chernyshova[2], Doctor,
e-mail: tetyana.che@gmail.com
O.E. Maevsky[3], D.Sc. (Medicine), Professor,
Head of the Department of Histology
e-mail: maevskyalex8@gmail.com
V.Ye. Krivonosov[4], docent,
Department of Biomedical Engineering
e-mail: yhtverf007@ukr.net
O.Yu. Azarkhov[4], D.Sc. (Medicine), Professor,
Head of the Department of Biomedical Engineering
e-mail: azarhov55@mail.ru
[1] Vinnytsia National Technical University,
Khmelnitskoe Highway, 95, 21021, Vinnytsia, Ukraine
[2] Medical Center of National Aviation University,
Cosmonaut Komarov ave., 1, 03058, Kyiv, Ukraine
[3] Nicholay Pirogov Vinnitsa National Medical University,
Pyrohova str, 56, 21000, Vinnytsia, Ukraine
[4] Priazovsky State Technical University,
Universytetska str, 7, 87500, Mariupol, Ukraine

INFORMATION TECHNOLOGY OF DETERMINING CIRCULAR TUMOR CELLS IN HUMAN BLOOD

Introduction. The development of information systems and technologies for the processing of medical images of cells obtained in the study of histological preparations is one of the most important and priority directions of modern medical science.

The purpose of the article is to detect the CPR at various localizations of malignant neoplasms is currently one of the topical issues in oncology.

Results. A distinctive feature of the circular tumor cells is the aggressive metastatic potential, which allows them to be considered as the main mechanism of tumor progression. The article describes the methods of detecting the circular tumor cells, the functions and operations of image processing. The modern methods and algorithms for processing and restoring biomedical images are analyzed. The work of information technology for the determination of circulating tumor cells in human blood is given step by step. A comparison of the developed technology and existing analogues is made.

Conclusions. Unlike the existing technology, it detects a 4-micromycle circular tumor cells in the study of blood samples from patients with micellar lung cancer. The doctor, thus, received an automatic technology for the determination of the circular tumor cells in peripheral or venous blood with high reliability and informativeness, with maximum preservation of the integrity and invulnerability of circulating tumor cells. The analysis of literary sources and their own clinical studies have confirmed that only technologies based on the ISET method allow the detection of very rare circulating trophoblast cells of the fetus from the mother's blood.

Keywords: *information technology, circulating tumor cell, medical image, histology, treatment, definition, criterion.*

ВНИМАНИЮ АВТОРОВ!

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

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

Требования к рукописям статей

1. Рукопись предоставляется на белой бумаге в двух экземплярах (язык — русский, украинский, английский, 12—16 с.) и электронная версия.

К рукописи прилагаются:

- аннотации — на русском и украинском языках (УДК, фамилия, инициалы автора/ов, название статьи, 5—6 строк текста, ключевые слова), на английском языке (фамилия, инициалы автора/ов, место работы, город, страна, название статьи, текст от 250 слов, с выделением рубрик: введение, цель, результаты, выводы, ключевые слова);
- лицензионный договор;
- сведения об авторе/ах на русском, украинском и английском языках должны включать: ФИО, ученую степень, научное звание, должность, отдел, место работы, почтовый адрес организации, телефон (служ., моб., дом.), E-mail, авторские идентификаторы ORCID или ResearcherID.

2. Текст статьи подается с обязательными рубриками: введение, постановка задачи, цель, результаты, четко сформулированные выводы.

Поданные статьи обязательно направляются на рецензирование ведущим специалистами в данной области.

Структура статьи

УДК. НАЗВАНИЕ. И.О. Фамилия / и. Организация/и. Аннотация (рус., 5—10 строк). Ключевые слова: (5—8 слов). ВВЕДЕНИЕ. ЦЕЛЬ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. РЕЗУЛЬТАТЫ (1—3 РАЗДЕЛА С НАЗВАНИЯМИ). ВЫВОДЫ.

Список литературы на языке оригинала — в порядке упоминания в тексте, по стандарту ДСТУ 8302: 2015.

Список литературы — перевод источников на английский язык, фамилии и инициалы авторов — транслитерация:

Author A.A. Article. *Journal*, 2000, vol. 1, № 2 pp. 111–112 (in Russian).

Author A.A., Author B.B. *Book*. City : Publisher, 2000. 111 p. (in Russian).

Резюме (укр., 5—10 рядків). Ключові слова (5—8 слів).

Abstract (0,5—0,7 р.): ФИО, Название статьи на английском языке. *Название организации — на английском языке.*

С обязательными рубриками: Introduction. Purpose. Results. Conclusion. Keywords.

Требования к текстовому файлу

Формат файла *.doc, *.rtf. Файл должен быть подготовлен с помощью текстового редактора Microsoft Word 2003.

Используемые стили: шрифт Times New Roman, высота 12 пт, межстрочное расстояние — полуторное. Формат бумаги А4, поля (слева, справа, вверху, внизу) 2 см.

Формулы набираются в редакторе формул **Microsoft Equation Editor 3.0.**

Опции редактора формул — (10,5; 8,5; 7,5; 14; 10). **Ширина формул не более 12 см.**

Рисунки должны быть достаточно качественными, созданы встроенным редактором рисунков Word Picture либо иными Windows-приложениями (в этом случае рисунки должны быть представлены отдельными файлами соответствующих форматов). **Ширина рисунков не более 12 см.**

Таблицы выполняются стандартным встроенным в Word инструментарием «Таблица». **Ширина таблицы не более 12 см.**

В розничную продажу журнал не поступает.

Оформление подписки для желающих опубликовать статьи в нашем журнале обязательно.

Подписка осуществляется:

- ГП «Пресса»: «Каталог видань України», подписной индекс 86598;
- Подписное агенство «Укринформнаука» НАН Украины, подписной индекс 10029, ukrinformnauka@gmail.com,