

# Кибернетика 4 (194)/2018 и вычислительная техника

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

## СОДЕРЖАНИЕ

Національний академії наук України — 100 років .....	5
<b>Информатика и информационные технологии</b>	
GRITSENKO V.I., RACHKOVSKIY D.A., REVUNOVA E.G. Neural Distributed Representations of Vector Data in Intelligent Information Technologies .....	7
ЕРМАКОВА И.И., НИКОЛАЕНКО А.Ю., СОЛОПЧУК Ю.М., ГРИЦАЮК О.В., ТАДДЕЕВА Ю.П. Информационная смартфон технология для прогноза состояния здоровья человека в экстремальных условиях среды .....	29
<b>Интеллектуальное управление и системы</b>	
STEPASHKO V.S. Formation and Development of Self-Organizing Intelligent Technologies of Inductive Modeling .....	41
<b>Медицинская и биологическая кибернетика</b>	
KOZAK L.M., KOVALENKO A.S., KRYVOVA O.A., ROMANYUK O.A. Digital Transformation in Medicine: From Formalized Medical Documents to Information Technologies of Digital Medicine .....	61
ВОВК М.І. Інформаційна технологія керування рухами. Еволюція синтезу і перспективи розвитку .....	79
<b>Информационные сообщения</b>	
До 100-річчя академіка НАН України БОРИСА ЄВГЕНОВИЧА ПАТОНА .....	98
Системный указатель статей, опубликованных в 2018 году .....	99
Вниманию авторов .....	100

# Cybernetics and Computer Engineering

4 (194)/2018

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

## CONTENTS

100 <sup>th</sup> Anniversary of the National Academy of Sciences of Ukraine .....	5
<b>Informatics and Information Technologies</b>	
GRITSENKO V.I., RACHKOVSKIJ D.A., REVUNOVA E.G. Neural Distributed Representations of Vector Data in Intelligent Information Technologies .....	7
YERMAKOVA I.I., NIKOLAIENKO A.Yu., SOLOPCHUK Yu.M., HRYTSAIUK O.V., TADEIEVA Yu.P. Information Smartphone Technology for Prediction of Human Health State Under Extreme Environmental Conditions .....	29
<b>Intelligent Control and Systems</b>	
STEPASHKO V.S. Formation and Development of Self-Organizing Intelligent Technologies of Inductive Modeling .....	41
<b>Medical and Biological Cybernetics</b>	
KOZAK L.M., KOVALENKO A.S., KRYVOVA O.A., ROMANYUK O.A. Digital Transformation in Medicine: From Formalized Medical Documents to Information Technologies of Digital Medicine .....	61
VOVK M.I. Information Technology of Movement Control. Evolution of Synthesis and Development Prospects .....	79
<b>Information messages</b>	
100 <sup>th</sup> Anniversary of the Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine BORYS YEVHENOVYCH PATON .....	98
<b>System index of articles published in 2018</b> .....	99
<b>To Attention of Authors</b> .....	100

# Кібернетика 4 (194)/2018 та обчислювальна техніка

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ ■ ЗАСНОВАНИЙ У 1965 Р. ■ ВИХОДИТЬ 4 РАЗИ НА РІК ■ КИЇВ

## ЗМІСТ

Національній академії наук України — 100 років .....	5
<b>Інформатика та інформаційні технології</b>	
ГРИЦЕНКО В.І., РАЧКОВСЬКИЙ Д.А., РЕВУНОВА О.Г. Нейромережеві розподілені подання векторних даних в інтелектуальних інформаційних технологіях ....	7
ЄРМАКОВА І.Й., НІКОЛАСНКО А.Ю., СОЛОПЧУК Ю.М., ГРИЦАЮК О.В., ТАДЕЄВА Ю.П. Інформаційна смартфон технологія для прогнозування стану здоров'я людини в екстремальних умовах середовища .....	29
<b>Інтелектуальне керування та системи</b>	
СТЕПАШКО В.С. Формування і розвиток самоорганізованих інтелектуальних технологій індуктивного моделювання .....	41
<b>Медицина та біологічна кібернетика</b>	
КОЗАК Л.М., КОВАЛЕНКО О.С., КРИВОВА О.А., РОМАНЮК О.О. Цифрова трансформація в медицині: від формалізованих медичних документів до інформаційних технологій цифрової медицини .....	61
ВОВК М.І. Інформаційна технологія керування рухами. Еволюція синтезу і перспективи розвитку .....	79
<b>Інформаційне повідомлення</b>	
До 100-річчя академіка НАН України БОРИСА ЄВГЕНОВИЧА ПАТОНА .....	98
Системний показник статей, опублікованих у 2018 році .....	99
До уваги авторів .....	100

---

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

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

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

Для наукових співробітників, інженерів, аспірантів і студентів ВНЗ відповідного фаху.

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

It is intended for researchers, practical engineers, PhD students of corresponding specialties.

В розничную продажу журнал не поступает.

**Подписка осуществляется:**

- ГП «Пресса»: «Каталог видань України», подписной индекс 86598;
- Подписное агентство «Укринформнаука» НАН Украины, подписной индекс 10029, [ukrinformnauka@gmail.com](mailto:ukrinformnauka@gmail.com)

## НАЦІОНАЛЬНІЙ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ — 100 РОКІВ

---



14 листопада 1918 року гетьман П. Скоропадський підписав Закон Української Держави про заснування Української академії наук. У Києві 27 листопада 1918 р. відбулося перше установче Спільне зібрання Української Академії наук, ця дата вважається днем її заснування. Було призначено перших 12 дійсних членів Академії. Перший президент і засновник Академії, **Володимир Іванович Вернадський** поклав в основу її створення поєднання принципів державного підпорядкування та самоврядності, а також фундаментальності з практичною спрямованістю наукових напрямів.

100-річна історія Академії — це шлях, сповнений постійного творчого пошуку і подвижницької праці вчених. Визначними періодами розбудови НАН України були 30–50-ті роки, за які створено її інфраструктуру, засновано низку наукових інститутів і науково-виробничих комплексів, та період 50–90-х років, коли було започатковано вагомі пріоритетні наукові напрями, значні результати яких стали передумовами становлення та розвитку України. За цей шлях, довжиною у сторіччя, сформувалися і вийшли на світовий рівень провідні вітчизняні наукові школи, створені такими видатними вченими, як М. Амосов, М. Боголюбов, О. Богомолець, О. Бродський, Д. Граве, В. Глушков, О. Динник, Л. Ландау, Ю. Митропольський, Є. Патон, Б. Патон, К. Синельников, М. Стражеско, В. Трефілов, В. Філатов, І. Францевич та іншими.

Зараз у Національній академії наук діють три секції: Секція фізико-технічних і математичних наук, Секція хімічних і біологічних наук, Секція суспільних і гуманітарних наук, які об'єднують 14 відділень та 6 регіональних центрів. Станом на 01.01.2018 до складу НАН України входять 177 дійсних членів (академіків), 352 члена-кореспондента та 98 іноземних членів.

Науковими установами НАН України впроваджено в практику десятки тисяч новітніх розробок, серед яких інформаційні технології для різних галузей виробництва та соціальної сфери, сучасні автоматизовані комплекси, устаткування та матеріали, ефективні методики господарювання та сорти рослин тощо. Концепція діяльності Академії, розроблена академіком В.І.Вернадським, дала змогу сформувати в Україні унікальний багатограний дослідницький комплекс, в якому органічно поєднано ефективне розроблення фундаментальних наукових проблем з розв'язанням актуальних завдань науково-технологічного, економічного, суспільно-політичного і духовно-культурного розвитку. Наука набула реальної сили забезпечення розвитку країни в усіх галузях суспільної діяльності.

### **100<sup>th</sup> ANNIVERSARY OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE**

In Kyiv on November 27, 1918, the First Constituent Assembly of the Ukrainian Academy of Sciences took place, this date is considered the day it was founded. The first President and founder of the Academy, Vladimir Vernadsky, laid the foundation for the Academy's establishment a combination of principles of state subordination and self-government, as well as fundamentalism with a practical orientation of scientific research.

The remarkable periods of NAS' development were 30–50<sup>th</sup> years, for which its infrastructure was created, a number of scientific institutes and scientific-industrial complexes were founded, and the period of 50–90<sup>th</sup>, when important priority scientific areas were started up, the significant results of which became preconditions for the establishment and development of Ukraine. The 100-year history of the Academy is a path full of constant creative search, the ascetic work of scientists, the way for which the leading domestic science schools were created by such prominent scholars as M. Amosov, M. Bogolyubov, O. Bohomolets, O. Brodsky, D. Grave, V. Glushkov, O. Dinnik, L. Landau, Yu. Mitropolsky, E. Paton and B. Paton, K. Sinelnikov, M. Strazhesko, V. Trefilov, V. Filatov, I. Frantsevich, and others.

The scientific institutions of the National Academy of Sciences of Ukraine have implemented tens of thousands of new developments, including information technologies for various industries and social sphere, modern automated complexes, equipment and materials, effective methods of management and plant sorts, etc. The concept of the Academy's work, developed by academician V. Vernadsky, made it possible to form a unique multifaceted research complex in Ukraine, in which the effective synthesis of fundamental scientific problems with the solution of the actual tasks of the technological, economic, social, political, and cultural development.

DOI: [https:// 10.15407/kvt194.04.007](https://10.15407/kvt194.04.007)

UDC 004.22 + 004.032.26

**GRITSENKO V.I.**, 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](mailto:vig@irtc.org.ua)

**RACHKOVSKIY D.A.**, DSc (Engineering), Leading Researcher,  
Dept. of Neural Information Processing Technologies  
e-mail: [dar@infrm.kiev.ua](mailto:dar@infrm.kiev.ua)

**REVUNOVA E.G.**, PhD (Engineering), Senior Researcher,  
Dept. of Neural Information Processing Technologies  
e-mail: [egrevunova@gmail.com](mailto:egrevunova@gmail.com)  
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. Glushkov av., 40, Kiev, 03187, Ukraine

## NEURAL DISTRIBUTED REPRESENTATIONS OF VECTOR DATA IN INTELLIGENT INFORMATION TECHNOLOGIES

---

**Introduction.** Distributed representation (DR) of data is a form of a vector representation, where each object is represented by a set of vector components, and each vector component can belong to representations of many objects. In ordinary vector representations, the meaning of each component is defined, which cannot be said about DR. However, the similarity of RP vectors reflects the similarity of the objects they represent.

DR is a neural network approach based on modeling the representation of information in the brain, resulted from ideas about a “distributed” or “holographic” representations. DRs have a large information capacity, allow the use of a rich arsenal of methods developed for vector data, scale well for processing large amounts of data, and have a number of other advantages. Methods for data transformation to DRs have been developed for data of various types — from scalar and vector to graphs.

**The purpose** of the article is to provide an overview of a part of the work of the Department of Neural Information Processing Technologies (International Center) in the field of neural network distributed representations. The approach is a development of the ideas of Nikolai Mikhailovich Amosov and his scientific school of modeling the structure and functions of the brain.

**Scope.** The formation of distributed representations from the original vector representations of objects using random projection is considered. With the help of the DR, it is possible to efficiently estimate the similarity of the original objects represented by numerical vectors.

© GRITSENKO V.I., RACHKOVSKIY D.A., REVUNOVA E.G. 2018

ISSN 2519-2205 (Online), ISSN 0454-9910 (Print). Киб. и выч. техн. 2018. № 4 (194)

*The use of DR allows developing regularization methods for obtaining a stable solution of discrete ill-posed inverse problems, increasing the computational efficiency and accuracy of their solution, analyzing analytically the accuracy of the solution. Thus DRs allow for increasing the efficiency of information technologies applying them.*

**Conclusions.** *DRs of various data types can be used to improve the efficiency and intelligence level of information technologies. DRs have been developed for both weakly structured data, such as vectors, and for complex structured representations of objects, such as sequences, graphs of knowledge-base situations (episodes), etc. Transformation of different types of data into the DR vector format allows unifying the basic information technologies of their processing and achieving good scalability with an increase in the amount of data processed.*

*In future, distributed representations will naturally combine information on structure and semantics to create computationally efficient and qualitatively new information technologies in which the processing of relational structures from knowledge bases is performed by the similarity of their DRs. The neurobiological relevance of distributed representations opens up the possibility of creating intelligent information technologies based on them that function similarly to the human brain.*

**Keywords:** *distributed data representation, random projection, vector similarity estimation, discrete ill-posed problem, regularization.*

## INTRODUCTION

The Department of Neural Information Processing Technologies of the International Research and Training Center for Information Technologies and Systems of the National Academy of Sciences and the Ministry of Education and Science of Ukraine (International Center) is the heir to the Department of Biological and Medical Cybernetics, which was organized by Academician Amosov in 1962.

The main direction of research was considered by N.M. Amosov to be in the development of efficient neural network information processing technologies based on computer modeling of the principles of human thinking and features of the neural organization of the brain [1], [2]. The information technologies are intended for solving problems related to the field of Artificial Intelligence.

In this paper, we consider some of the research directions that have been developed over the past 20-ty years. Other areas are discussed in [3], [4]. Since the 1980s, the paradigm of associative-projective neural networks (APNNs) has been developed in the department [5], [2]. The idea of APNNs is to combine the hierarchical organization of the world model of Amosov with the advantages of structurally sensitive distributed representations as well as assemblies of Hebb.

APNNs are based on "distributed representations" of data of various types, nature, and complexity. Distributed representation [7], [8], [9], [10], [11] is a neural network approach based on modeling the representation of information in the brain that stemmed from the ideas of "distributed" or "holographic" representation of information.

Distributed representation (DR) of data is a form of a vector representation, where each object is represented by a set of vector components, and each vector component can belong to representations of many objects. In ordinary vector representations, the meaning of each component is defined, which cannot be said about DR. However, the similarity of the DR vectors reflects the similarity of the objects they represent.

Since DRs of various objects (from individual features to complex structured episodes of knowledge bases that are represented by hierarchically organized graphs) are vectors, a rich arsenal of methods developed for vector data can be



applied to their processing. The computational complexity of these methods is usually not too high. For example, the complexity of calculating many measures of similarity of vectors is linear with respect to their dimension, while the complexity of calculating the editing distance between graphs is NP-complex in the general case. In addition, some types of DRs can reduce the complexity of computations compared to the vector representations from which they are obtained by reducing the dimension or using special formats for the DR vectors, such as binary and sparse ones. Distributed representations based on random projections are effectively used to regularize inverse machine learning problems, where the properties of the input-output transformation matrix lead to solution instability. Note that similar methods are being developed in areas known as "randomized algorithms", "random projections", "hyperdimensional computing" etc.

The DRs of APNNs use binary vectors with  $\{0,1\}$  components, which we call codevectors. Codevectors are sparse vectors, that is the proportion of non-zero components of the codevector is small. This data representation format is used in search engines, it allows one to achieve high efficiency of distributed auto-associative memory [12], [13], [14] and it is also required for the operation of APNNs. However, DRs can also be useful in the form of real-valued vectors (of small dimension), if they increase the processing efficiency relative to the initial representations of objects, such as vectors of high dimensionality, etc.

This article provides an overview of the distributed vector representations of source vector data on the basis of random projection, developed at the International Center both for efficient estimation of similarity of the initial vectors and for solving discrete inverse problems. The methods are protected by three patents and are used in information technologies for efficient processing of large data sets (Big Data) based on similarity as well as for efficient and accurate processing of signal information.

## **SIMILARITY ESTIMATION WITH DISTRIBUTED REPRESENTATIONS OF VECTOR DATA BASED ON RANDOM PROJECTIONS**

Real-valued distributed representation of vector data is based on random projections. Most electronic digital data can be represented in the form of matrices or tables. For example, text corpuses for the purposes of search or classification are considered as word-text matrices, where the columns are texts, and the rows are words. The same information can be interpreted as a set of points in multidimensional space. The dimension of space can be, for example, hundreds of thousands (by the number of words in a language), and the number of points can be millions and billions (by the number of Internet web pages).

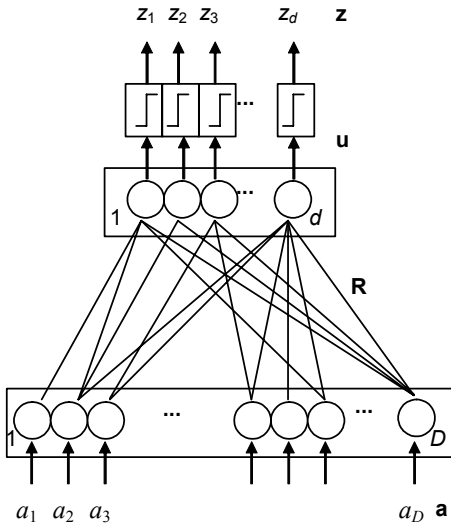
Many methods and algorithms of information retrieval, classification, clustering, approximation, learning, example-based reasoning, associative memory, etc. use measures of differences and similarities of vectors, such as Euclidean distance, scalar product, angle. Therefore, it would be useful to operate with transformed vector representations that have similarities consistent with the similarities in the original multidimensional vector space, but are more efficient in terms of saving memory, processing speed, the possibility of using special methods of data storage and processing.

Such a transformation can be performed by using a perceptron-like neural network. To solve the problems of classification, approximation, heteroassociative memory and others, the weights of the connections of such networks are usually tuned to the training set, starting with random weights. However, neural networks with a random structural organization have a number of useful properties.

We transform the input data, represented as the input matrix  $A(D \times N)$ , where  $N$  is the number of vectors, into the matrix  $U(d \times N)$  by its feed, vector-by-vector, to a single-layer perceptron (Fig. 1) with random connections represented as a matrix  $R(d \times D)$ , and thus performing  $U = RA$ . Note that for each vector-result of multiplication, component-based binarization operation can also be applied (see the next Subsection).

With a certain choice of  $R$ , by the resulting vectors (that is, by the  $d$ -dimensional column vectors of the matrix  $U$ ), the distances between the original  $D$ -dimensional vectors in  $A$  can be calculated with high accuracy and computationally efficiently, even with  $d \ll D$ . For example, this is true for a random matrix  $R$  whose elements are formed as realizations of a Gaussian random variable.

Note that the components of the input vectors in our example with the presentation of texts had explicit semantics, i.e., the component corresponded to the word, and its value was a function of the occurrence frequency of the word in the text. The components of the output vectors corresponding to the texts no longer have such semantics of the components. However, similar output vectors correspond to similar input vectors. Such vectors are an example of distributed representations.



**Fig. 1.** Single-layer perceptron for transforming vector data by random projection

Random numbers in the floating point format required to represent Gaussian random variables are computationally difficult to generate, and they occupy a lot of space. Obviously, the simplest embodiment of the elements of random matrices are binary random variables with values of 0 and 1. They can be easily generated and stored. Then multiplication by a binary matrix is reduced to addition, that is, computationally simple. Note that binary random matrices in a neural network implementation are simply the set of present or missing links (of equal weight) between two pools of neurons. Therefore, of interest are methods of generating DRs using random binary matrices.

To transform the input vectors given in the floating-point format to the output vectors in the same format, we proposed to use projection by a random matrix with binary elements from the set  $\{0, 1\}$ . The element of the matrix takes value 1 with probability  $q$ , and the value 0 with probability  $1 - q$ . To center the result of the multiplication, we subtract  $q \sum_{j=1,D} a_j$  from it. Centering can also be provided by a binary matrix with the elements  $\rho_{ij} = r_{ij} - q$ . The analysis was carried out for such a matrix, and its results are close to the experimental results for the initial binary (sparse) matrix.

The output vectors allow estimating the scalar product and the Euclidean distance, as well as the Euclidean norm of the original vectors. The computational efficiency of the estimate increases as the dimension of the output vectors decreases. The error of estimating these similarity-difference measures was analyzed analytically and experimentally.

To compare the error of estimating the scalar product and the Euclidean distance by vectors after a random projection, it is informative to use the normalized standard deviation (coefficient of variation), i.e. the ratio of the root of the variance of the estimate to its expectation.

In [15], [16] it was shown that for the scalar product, the coefficient of variation  $\text{Var}^{1/2}\{\langle \mathbf{a}, \mathbf{b} \rangle^*\} / E\{\langle \mathbf{a}, \mathbf{b} \rangle^*\}$  is equal to

$$(\langle \mathbf{a}, \mathbf{b} \rangle d^{1/2})^{-1} [ (E\{\rho^4\} / E^2\{\rho^2\} - 3) \sum_{j=1,D} (a_j b_j)^2 + \langle \mathbf{a}, \mathbf{b} \rangle^2 + \|\mathbf{a}\|^2 \|\mathbf{b}\|^2 ]^{1/2}$$

and the square of the Euclidean distance  $\text{Var}^{1/2}\{\|\mathbf{a} - \mathbf{b}\|^2\} / E\{\|\mathbf{a} - \mathbf{b}\|^2\}$  is equal to

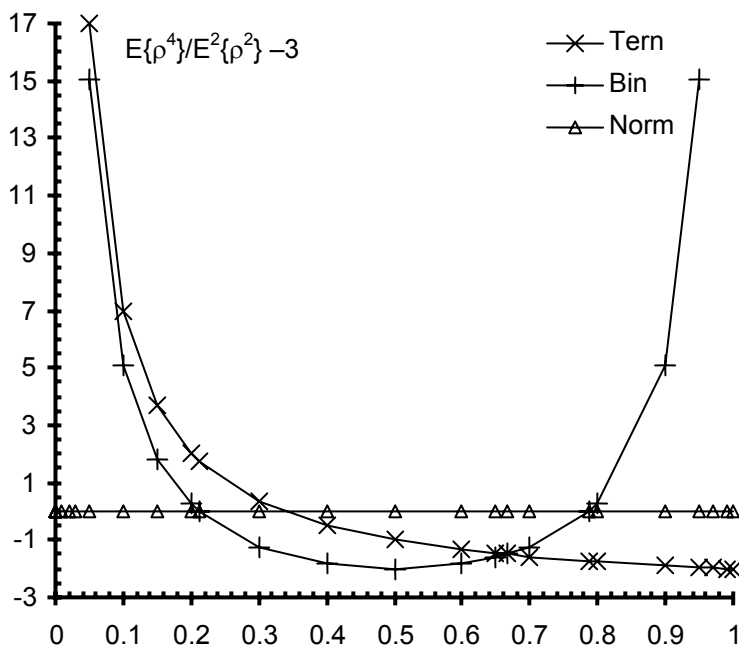
$$(\|\mathbf{a} - \mathbf{b}\|^2 d^{1/2})^{-1} [ (E\{\rho^4\} / E^2\{\rho^2\} - 3) \sum_{j=1,D} (a_j - b_j)^4 + 2 \|\mathbf{a} - \mathbf{b}\|^4 ]^{1/2}.$$

Here  $\rho$  is a random variable, an element of the random matrix  $\mathbf{R}$  (taking centering into account). Thus, for different distributions of  $\rho$ , we obtain various expressions for the coefficient of variation.

For a Gaussian random matrix i.i.d. elements, the value  $E\{\rho^4\} / E^2\{\rho^2\} = 3$  [15].

For the binary random projection matrix under consideration (taking centering into account), it can be shown [16] that  $E\{\rho^4\} / E^2\{\rho^2\} = 1/(q - q^2) - 3$ . For a ternary matrix with elements from  $\{-1/q^{1/2}, 0, +1/q^{1/2}\}$  with probabilities  $\{q/2, 1 - q, q/2\}$  we get  $E\{\rho^4\} / E^2\{\rho^2\} = 1/q$ .

Let's compare the estimation errors obtained by projecting binary and ternary random matrices. The ratio  $E\{\rho^4\} / E^2\{\rho^2\}$  for a binary random matrix is less than for a ternary one ( $1/(q - q^2) - 3 < 1/q$ ) when  $q < 2/3$ . Therefore, for  $q < 2/3$  the error of estimates obtained after the binary random projections that we propose is smaller than after ternary random projections at the same probability  $q$  of a nonzero matrix element (Fig. 2).



**Fig. 2.** The value  $E\{p^4}/E^2\{p^2\} - 3$  vs the probability  $q$  of a nonzero element of the matrix. Binary matrix (Bin), ternary matrix (Tern), Gaussian matrix (Norm)

Let us compare the error estimates for the binary and Gaussian random matrices. Since  $1/(q - q^2) - 6 < 0$  for  $1/2 - 1/(2\sqrt{3}) < q < 1/2 + 1/(2\sqrt{3})$  (i.e., for  $q \approx [0.2112, 0.7887]$ ), then binary random projections provide in this range the accuracy is higher than Gaussian (the greatest gain is achieved when  $q = 0.5$ ). On the other hand, projection acceleration requires  $q \ll 0.5$ , where the binary matrix loses due to the presence in the error of the terms with positive coefficients at  $\sum_{j=1,D} (a_i b_i)^2$  and  $\sum_{j=1,D} (a_i - b_i)^4$ . However, when  $D \gg 1$ , their contribution is small (for data with a finite fourth moment), therefore, we obtain an accuracy comparable to the accuracy of Gaussian random projections, and for the case  $q \ll 0.5$ .

As for other types of random projection matrices, the error decreases with increasing dimension  $d$  of the output vectors  $\sim 1/d^{1/2}$ . Computational efficiency increases with decreasing  $q$  (with increasing "sparseness" of the binary projection matrix). In order to preserve the accuracy of estimates, the input vectors must have a sufficiently large dimension, as is assumed by the very formulation of the problem of efficiently evaluating the similarity of multidimensional vectors.

**Binary distributed representation of vector data based on random projections.** Let us apply in the output neurons of the perceptron network (Fig. 1) the binarizing threshold transformation  $\mathbf{u} \rightarrow \mathbf{z}$ :  $z_i = 1$  when  $u_i \geq t_i$  and  $z_i = 0$  when  $u_i < t_i$ , where  $t_i \geq 0$  is the threshold value for the  $i$ -th component of the output vector,  $i = 1, \dots, d$ .

The degree of sparseness of binary output vectors is governed by the threshold value. Moreover, the number of bits to represent binary vectors may be less

than the number of bits per floating point representation of the vectors, even if the dimension of the binary vectors is larger.

After binarization  $\mathbf{u} \rightarrow \mathbf{z}_1$  with a threshold  $t_1$  and  $\mathbf{v} \rightarrow \mathbf{z}_2$  with a threshold  $t_2$ , we determine the probability of coincidence of the unity components  $z_{1,i} = 1$  and  $z_{2,i} = 1$  of the codevectors  $\mathbf{z}_1$  и  $\mathbf{z}_2$ . For standardized random variables  $(u_i, v_i)$ , this probability is the probability of a simultaneous excess of the threshold values by the quantities  $u_i$  and  $v_i$ . The probability value is determined by the integral of the two-dimensional Gaussian distribution:

$$p_{\text{join}}(\theta) \equiv p(z_{1,i} = 1, z_{2,i} = 1 \mid \theta, t_1, t_2) = p(u_i \geq t_1, v_i \geq t_2 \mid \theta, t_1, t_2) =$$

$$= \frac{1}{2\pi(1 - \cos^2\theta)} \int_{t_1}^{\infty} \int_{t_2}^{\infty} e^{-\frac{\eta_1^2 - 2\eta_1\eta_2\cos\theta + \eta_2^2}{2(1 - \cos^2\theta)}} d\eta_1 d\eta_2.$$

Thus  $p_{\text{join}}$  is a function of angle  $\theta$ . From the  $p_{\text{join}}$  value, we can obtain the angle  $\theta$  as  $\theta = g(p_{\text{join}})$ , where  $g$  is the function inverse to the function  $p_{\text{join}}(\theta)$ .

Therefore,  $\theta$  can be estimated as follows:

- tabulate the  $p_{\text{join}}(\theta)$  function;
- transform the input vectors into output codevectors  $\mathbf{z}_1$  and  $\mathbf{z}_2$ , as indicated above;
- estimate  $p_{\text{join}}$  as  $\langle \mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2 \rangle / d$ ;
- find in the tabulated table the value  $p_{\text{join}}$  closest to  $\langle \mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2 \rangle / d$  and use the corresponding angle  $\theta^*$  as the estimate of  $\theta$ .

To standardize random variables  $(u_i, v_i)$  for matrices  $\mathbf{R}$  from a symmetric distribution (e.g., Gaussian or ternary distribution with elements from  $\{-1, 0, +1\}$ ), it is sufficient to apply scaling. For binary  $\mathbf{R}$  it is also necessary to center, which is performed by subtracting  $q \sum_{j=1,D} a_j$ , and scaling is done by dividing by  $(q - q^2)^{1/2} \|\mathbf{a}\|$ .

The binarization threshold was chosen above under the assumption of a Gaussian distribution, and the relationship between  $p_{\text{join}}$  and  $\cos \theta$  was made under the assumption of a two-dimensional Gaussian distribution. When projected by binary  $\mathbf{R}$ , the distributions are not Gaussian, but they converge to them. Analytically and experimentally we investigated the convergence of the distribution of the components of the real-valued vector, i.e., the result of the random projection, to the Gaussian distribution, and the rate of convergence. For this, the Lyapunov fraction of the third order (denoted by  $L_D$ ) was used. For the sum of  $D$  random variables obtained by multiplying the input vector  $\mathbf{a}$  by a row of the random matrix, the Lyapunov fraction can be represented as a product of two fractions,  $L_a$  and  $L_r$ :

$$L_D = \frac{E\{|r - E\{r\}|^3\}}{(E\{|r - E\{r\}|^2\})^{3/2}} \frac{\sum_{j=1}^D |a_j|^3}{\|\mathbf{a}\|_2^3} = L_r L_a, \quad L_r \equiv \frac{E\{|r - E\{r\}|^3\}}{(E\{|r - E\{r\}|^2\})^{3/2}},$$

$$L_a \equiv \frac{\sum_{j=1}^D |a_j|^3}{\|\mathbf{a}\|_2^3}.$$

The fraction  $L_a$  depends on the input vector  $\mathbf{a}$  and on  $D$  and does not depend on the type of random matrix  $\mathbf{R}$ , and the fraction  $L_r$  depends on the distribution of random variables used in  $\mathbf{R}$ .

According to the strong law of large numbers, the sample average of  $D$  realizations of independent and identically distributed random variables converges almost surely to the expected value (if it exists and finite) at  $D \rightarrow \infty$ . Apply this

to  $L_a$ . Represent  $L_a$  as  $L_a \equiv \frac{1}{D^{1/2}} \frac{\sum_{j=1}^D |a_j|^3 / D}{(\sum_{j=1}^D |a_j|^2 / D)^{3/2}}$ .

We assume that the components  $a_j$  of the input vector  $\mathbf{a}$  are realizations of random variables with a finite third absolute moment  $E\{|a_j|^3\} < \infty$ . Then the moments of smaller orders are also finite, in particular,  $E\{|a_j|^2\} < \infty$ . We use the strong law of large numbers for r.v.  $|a_j|^3$  and for r.v.  $|a_j|^2$ . We obtain that when  $D \rightarrow \infty$ , then  $\sum_{j=1,D} |a_j|^3 / D \rightarrow E\{|a_j|^3\} < \infty$  and  $\sum_{j=1,D} |a_j|^2 / D \rightarrow E\{|a_j|^2\} < \infty$ .

Therefore,  $L_a$  converges as follows:

$$L_a \equiv \frac{1}{D^{1/2}} \frac{\sum_{j=1}^D |a_j|^3 / D}{(\sum_{j=1}^D |a_j|^2 / D)^{3/2}} \rightarrow \frac{c}{D^{1/2}}, c \equiv \frac{E\{|a_j|^3\}}{(E\{|a_j|^2\})^{3/2}}.$$

Now consider  $L_r$ . It is easy to see [17] that for binary  $\mathbf{R}$  the absolute central moments are equal to  $E\{|r - q|^3\} = (q - q^2)(1 - 2(q - q^2))$  and  $E\{|r - q|^2\} = q - q^2$ . We obtain the expression for the fraction  $L_r = (1 - 2q + 2q^2)/(q - q^2)^{1/2}$ . Since  $0 < q < 1$ , then  $1/2 \leq 1 - 2q + 2q^2 < 1$  and  $L_r \leq 1/(q - q^2)^{1/2}$ .

Therefore, for a binary random matrix, the behavior of the entire Lyapunov fraction  $L_D$  is determined by the expression  $(1/(q - q^2)/D)^{1/2}$  when  $D \rightarrow \infty$ . Convergence to a Gaussian distribution occurs if the expression tends to zero, that is, if  $1/(q - q^2) = o(D)$ .

The rate of convergence of the cumulative distribution function of the sum of independent random variables to the Gaussian cumulative distribution function can be estimated by the Berry-Esseen inequality. Its use in this problem is considered in [17]. The rate of convergence of the distribution of the components of a real-valued vector (the result of random projection) to the Gaussian distribution was studied analytically and experimentally for random matrices with discrete elements from  $\{-1, 0, 1\}$  (ternary matrices) and from  $\{0, 1\}$  (binary matrices). Using sparse random binary or ternary matrices instead of Gaussian random matrices allows obtaining output codevectors whose properties are similar to the properties of codevectors obtained using Gaussian matrices, when the dimension of input vectors is sufficiently high.

For binary and ternary random matrices, the experimental estimates of the difference between the distribution of  $u$  and the Gaussian distribution for the entire range of parameters studied are significantly less than the analytical limit values calculated by the right-hand side of the Berry-Esseen inequality. Experimental results for binary and ternary matrices are close to each other, the same is observed for analytical results.

Experimental results show that with the input vector dimension  $D = 1000$ , the difference between empirical and Gaussian distributions becomes close to the error level obtained due to the estimation of empirical distributions by the

finite sample. This was observed for the studied probabilities  $q = \{0.5, 0.1, 0.01\}$  of nonzero elements in random matrices.

The obtained results show that for parameters for which the empirical distributions are not very different from the Gaussian ones, the experimental and analytical errors in the angle determination by the output binary codevectors are also small. With the dimension of the input vector  $D = 1000$ , the experimental and analytical errors are close for all parameters studied. It follows that in applications it is necessary to comply with the condition  $Dq > 10$ .

Obviously, the smaller  $q$ , the greater the possibility of accelerating the implementation of vector projection. In this case, the projection by the binary matrix is potentially more efficient than by the ternary one, and even more so than by the Gaussian matrix.

We investigated [18] the estimates of similarity measures for real-valued vectors by binary codevectors obtained by projecting with a random binary matrix and then using the output threshold transform that allows us to adjust the degree of sparsity (the fraction of non-zero components) of binary codevectors. The similarity of binary codevectors was estimated by measures based on dot product (normalized to the codevector dimension).

The values of these codevector similarity measures decrease monotonically with increasing angle between the original real-valued vectors, and allow us to estimate the angle  $\theta$ . The estimate together with the knowledge of the values of the Euclidean norms of the original real-valued vectors  $\|\mathbf{a}\|_2, \|\mathbf{b}\|_2$  also made it possible to estimate their dot product  $\langle \mathbf{a}, \mathbf{b} \rangle^* = \|\mathbf{a}\| \|\mathbf{b}\| \cos \theta^*$  and Euclidean distance  $\|\mathbf{a} - \mathbf{b}\|^2 = (\|\mathbf{a}\|^2 + \|\mathbf{b}\|^2 - 2 \|\mathbf{a}\| \|\mathbf{b}\| \cos \theta^*)^{1/2}$ . The dependences of the error in estimating the angle, the scalar product, the Euclidean distance between the input real-valued vectors, on the angle value between them were analyzed analytically and experimentally.

To determine the expectation and variance of the angle estimate from the estimate  $p_{\text{join}}^* = \langle \mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2 \rangle / d$  the linearization of the function of the random argument (delta-method) was used. The number of matching unit components  $|\mathbf{A} \wedge \mathbf{B}|$  codevectors  $\mathbf{A} = \mathbf{A}(a)$  and  $\mathbf{B} = \mathbf{B}(b)$  of dimension  $d$  has a binomial distribution with probability of "success"  $p_{\text{join}}$  and  $d$  degrees of freedom, i.e. with the expectation value  $dp_{\text{join}}$  and the variance  $dp_{\text{join}}(1 - p_{\text{join}})$ . The estimate of  $p_{\text{join}} = \text{sim}(a, b)$  by the empirical probability (or sample mean)  $p_{\text{join}}^* = |\mathbf{A} \wedge \mathbf{B}| / d$  is unbiased:  $E\{p_{\text{join}}^*\} = E\{|\mathbf{A} \wedge \mathbf{B}| / d\} = E\{|\mathbf{A} \wedge \mathbf{B}|\} / d = dp_{\text{join}} / d = p_{\text{join}}$ .

Returning to the estimate  $\text{sim}^*$  by  $p_{\text{join}}^*$ , we get  $E\{\text{sim}^*\} \approx g(E\{p_{\text{join}}^*\})$  and  $\text{Var}\{\text{sim}^*\} \approx (g'(E\{p_{\text{join}}^*\}))^2 \text{Var}\{p_{\text{join}}^*\}$ , with  $E\{p_{\text{join}}^*\}$  and  $\text{Var}\{p_{\text{join}}^*\}$  calculated as above. An approximate value of the derivative of  $g'(E\{p_{\text{join}}^*\})$  can be determined for  $g$  specified using tabulation.

Errors of estimates by  $|\mathbf{A} \wedge \mathbf{B}|/|\mathbf{A}|$  and by  $1 - |\mathbf{A} \oplus \mathbf{B}|/d$  (where  $\oplus$  is the component-wise XOR operation) are obtained similarly. The error values for binary and ternary random matrices are close for the studied parameter values. However, the proposed computational implementation of the transformation using a binary random matrix makes it easier.

A promising topic of further work is to study the effect of modifications of the proposed methods on the accuracy of similarity estimates, for example: using the real fraction of non-zero elements in the matrix as well as in its rows and

columns instead of the probability of non-zero elements; the use of random matrices with a fixed number of randomly located non-zero elements in the entire matrix, as well as in its columns; taking into account the real fraction of non-zero components in the output binary codevectors when estimating the angle based on their dot product.

## **DISTRIBUTED REPRESENTATIONS BASED ON RANDOM PROJECTIONS FOR REGULARIZATION OF INVERSE PROBLEMS SOLVING IN MACHINE LEARNING**

In problems of statistics and machine learning, a situation often arises when the solution by existing methods is unstable, i.e. small changes in the input data (conditions of the problem) lead to a large change in the solution. Such unstable solutions are inaccurate and cannot be used in practice. To remove the instability of the solution, the regularization approach is used.

Regularization imposes stability constraints on the sought solution. For example, a compromise of accuracy and stability is provided by choosing a regularization parameter that weights the ratio of the magnitude of the norm of the difference between the vectors of the reconstructed and the observed output, as well as the magnitudes of the norm of the solution vector (that is, the reconstructed input).

Our studies of the regularizing properties of random projection has begun since 2009 [19]. Later other researchers began to explore the regularizing properties of random projection, for example, for classification problems and machine learning [20], and, more recently, for solving inverse problems [21]. Since the approach of random projection, along with improving the accuracy of the solution by regularization, reduces the computational complexity of the solution, we have managed to develop algorithms that provide an accurate and fast solution for discrete inverse problems [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28].

Let us consider in more detail the regularization of the inverse problem based on random projection. In many practical applications, signal transformation is described by a linear model of the form  $\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \boldsymbol{\varepsilon}$ , where the matrix  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{N \times N}$  and the measurement vector  $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^N$  ( $\mathbf{y} = \mathbf{y}_0 + \boldsymbol{\varepsilon}$ ,  $\mathbf{y}_0 = \mathbf{A}\mathbf{x}$ ) are known. The components of the noise vector  $\boldsymbol{\varepsilon} \in \mathbb{R}^N$  are realizations of independent Gaussian random variables with zero mean and variance  $\sigma^2$ . The signal vector  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^N$  has to be estimated.

In the case when  $\mathbf{y}$  contains noise and the series of singular numbers of the matrix  $\mathbf{A}$  smoothly drops to zero (with  $\mathbf{A}$  having a high conditionality number), the problem of estimating  $\mathbf{x}$  is called the discrete ill-posed problem (DIP) [29]. For DIP, the solution (estimate of signal  $\mathbf{x}$ ) obtained on the basis of a pseudoinversion as  $\mathbf{x}^* = \mathbf{A}^+ \mathbf{y}$ , where  $\mathbf{A}^+$  is a pseudoinverse [30], [31] is unstable and inaccurate. To overcome the instability and improve the accuracy of the solution, a regularization approach is used.

One of the approaches to ensuring the stability of solving ill-posed problems is the use of an integer regularization parameter, which is the number of summands in the model (linear with respect to parameters) approximating the original data. To obtain a stable solution (estimation  $\mathbf{x}^*$ ), such methods as truncated singular value decomposition [32], truncated QR decomposition, and the method based on random projection [25], [26], [33] can be used.



To obtain solution based on random projection, both sides of the original equation are multiplied by the matrix  $\mathbf{R}_k \in \mathfrak{R}^{k \times N}$  resulting in the equation

$$\mathbf{R}_k \mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{R}_k \mathbf{y},$$

where  $(\mathbf{R}_k \mathbf{A}) \in \mathfrak{R}^{k \times N}$ ,  $(\mathbf{R}_k \mathbf{y}) \in \mathfrak{R}^k$ . The vector of the recovered signal is obtained as

$$\mathbf{x}_k^* = (\mathbf{R}_k \mathbf{A})^+ \mathbf{R}_k \mathbf{y}.$$

As a random matrix  $\mathbf{R}$  we use:

- the matrix  $\mathbf{G}_k \in \mathfrak{R}^{k \times N}$  whose elements are realizations of a random variable with a Gaussian distribution, zero mean and unit variance;
- the matrix  $\mathbf{Q}_k \in \mathfrak{R}^{k \times N}$  obtained by QR decomposition of  $\mathbf{G}_k$  matrix ( $\mathbf{G}_k = \mathbf{Q}_k \mathbf{R}_k$ );
- the matrix  $\mathbf{\Omega}_k \in \mathfrak{R}^{k \times N}$  obtained by SVD decomposition of  $\mathbf{G}_k$  matrix ( $\mathbf{G}_k = \mathbf{\Omega}_k \mathbf{\Sigma} \mathbf{\Psi}^T$ ).

Similar to estimating  $\mathbf{x}$  based on truncated SVD  $\mathbf{x}_{k \text{ SVD}}^* = \sum_{i=1}^k \mathbf{v}_i s_i^{-1} \mathbf{u}_i^T \mathbf{y}$

(where  $\mathbf{u}_i \in \mathfrak{R}^N$ ,  $\mathbf{v}_i \in \mathfrak{R}^N$  are left and right singular vectors,  $s_i$  are singular values), an estimate based on random projection can be represented by a linear model of the form [26]:

$$\mathbf{x}_{k \text{ R}}^* = \sum_{i=1}^k \mathbf{h}_i \mathbf{r}_i^T \mathbf{y},$$

where  $\mathbf{r}_i \in \mathfrak{R}^N$  is the column of the matrix  $\mathbf{R}_k = [\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_k]$ , which is the result of a SVD of the matrix  $\mathbf{R}$ , whose elements are random variables with a normal distribution;  $\mathbf{h}_i \in \mathfrak{R}^N$  is the column of the matrix  $(\mathbf{Q}_k^T \mathbf{A})^+ = [\mathbf{h}_1, \dots, \mathbf{h}_k]$ . Experimental studies have shown that there is an optimal number  $k$  ( $k < N$ ) of the  $\mathbf{R}$  rows, which minimizes the error  $e_x = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_k^*\|^2$  of the true signal recovering.

Fig. 3 shows an example of the  $\mathbf{x}$  recovery error  $e_{\text{xQ}}$  (and its components  $e_{\text{xQ}_1}$  and  $e_{\text{xQ}_2}$ ) dependencies on  $k$  for the Phillips problem for three noise levels  $\{10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}\}$ .

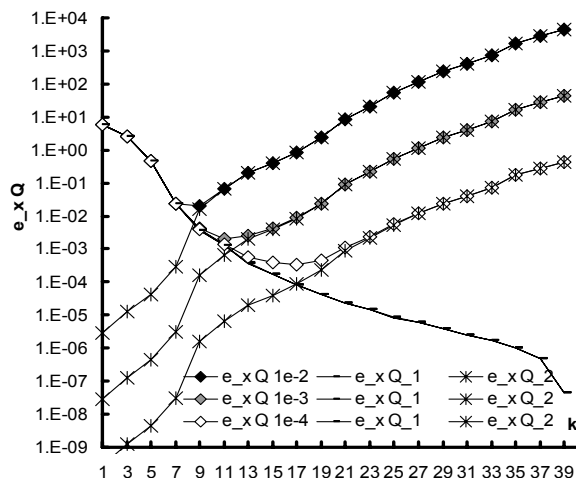
In reality, it is impossible to calculate the error  $e_x(k)$  due to the lack of information about  $\mathbf{x}$ ; therefore, it is impossible to directly determine the optimal  $k$ . To select  $k$  close to optimal, use the model selection criterion (MSC), i.e., a function that has an extremum when  $k$  is close or equal to optimal ([35], [36]).

When creating a MSC for solving DIP, it is required:

- to present an error in the form of the sum of two error components;
- to show increasing and decreasing of error components;
- to show that the dependence on  $k$  of the recovery error of  $\mathbf{x}$  and of the recovery error of  $\mathbf{y}_0$  has the global minima that coincide or are close;
- to obtain an expression for estimating the recovery error of  $\mathbf{y}_0$  using the known measurement vector  $\mathbf{y}$ .

**Search for the optimal number of rows of a random matrix.** In [23], expressions for the recovery error of  $\mathbf{x}$  were obtained for the random projection method:

$$e_x = \|(\mathbf{F}_k^+ \mathbf{F}_k - \mathbf{I})\mathbf{x}\|^2 + \sigma^2 \text{trace}(\mathbf{F}_k^+ \mathbf{F}_k)$$



**Fig. 3.** Recovery error and its components vs the number  $k$  of the random matrix rows

as well as for the recovery error of  $\mathbf{y}_0$ :

$$e_y = \|(\mathbf{A}\mathbf{F}_k^+ \mathbf{Q}_k^T - \mathbf{I})\mathbf{y}_0\|^2 + \sigma^2 \text{trace}(\mathbf{F}_k^+ \mathbf{A}^T \mathbf{A} \mathbf{F}_k^+).$$

The number of columns  $N$  of the matrix  $\mathbf{Q}_k$  is determined by the size of the original matrix  $\mathbf{A}$ . The number of rows  $k$  is not fixed a priori and can vary from 1 to  $N$ . The dependence of the error components ( $e_x$ ,  $e_y$ ) on the number of rows  $k$  of the matrix  $\mathbf{Q}_k$  was analytically studied in [25]. Such a study is based on the representation of the matrix  $\mathbf{F}_k = \mathbf{Q}_k^T \mathbf{A}$  as the sum of the original matrix and the perturbation matrix.

In order to study the behavior of the components of the error  $e_x$  depending on  $k$ , we write the expression to get  $\mathbf{F}_k^+$  in a recursive form. To do this, we use the representation of the perturbation of a pseudo-inverse matrix through the perturbation of the original matrix, proposed by Stewart:

$$\mathbf{B}^+ - \mathbf{A}^+ = -\mathbf{B}^+ \mathbf{P}_B \mathbf{E} \mathbf{R}_A \mathbf{A}^+ + \mathbf{B}^+ \mathbf{P}_B \mathbf{P}_A^\perp - \mathbf{R}_B^\perp \mathbf{R}_A \mathbf{A}^+,$$

where  $\mathbf{B} = \mathbf{A} + \mathbf{E}$ ,  $\mathbf{E}$  is the perturbation matrix,  $\mathbf{P}_A = \mathbf{A}\mathbf{A}^+$  is the projector on the subspace of column vectors of the matrix  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{R}_A = \mathbf{A}^+ \mathbf{A}$  is the projector on the subspace of row vectors of the matrix  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{P}_A^\perp = \mathbf{I} - \mathbf{P}_A$  and  $\mathbf{R}_A^\perp = \mathbf{I} - \mathbf{R}_A$  are the projectors on the orthogonal complement of these subspaces, respectively.

Based on this representation, recursive expressions are obtained for the stochastic and deterministic components of the true signal recovery error. These expressions are a tool for studying the tendencies of (increasing, decreasing) behavior of the error components depending on  $k$ . The matrix  $\mathbf{F}_k = \mathbf{Q}_k^T \mathbf{A}$  is formed as:

$$\mathbf{F}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{k-1} \\ \mathbf{0}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{k-1} \\ \mathbf{f}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{k-1} \\ \mathbf{f}_k \end{bmatrix},$$

where  $\mathbf{F}_{k-1} \in \mathcal{R}^{k-1 \times N}$ , the row vector  $\mathbf{f}_k = \mathbf{q}_k \mathbf{A}$  has dimension  $k$ ,  $\mathbf{q}_k$  is the row of the matrix  $\mathbf{Q}_k = [\mathbf{q}_1, \dots, \mathbf{q}_k]^T$ ,  $\mathbf{O}_{k-1}$  is the zero submatrix size of  $(k-1) \times N$ . As a perturbation of the matrix  $\mathbf{F}_{k-1}$ , we consider a matrix  $\mathbf{E}_k \in \mathcal{R}^{k \times N}$  containing one non-zero  $k$ -th row  $\mathbf{f}_k$ , which is added at the  $k$ -th step.

In [25], recursive expressions for the stochastic and deterministic error components were obtained. For the stochastic component of the true signal recovery error, the recursive expression has the form:

$$e_{xs}(k) = \sigma^2 \text{trace}(\mathbf{F}_k^{+T} \mathbf{F}_k^+) = e_{xs}(k-1) + \sigma^2 \text{trace}(\mathbf{M}_{k-1}^T \mathbf{M}_{k-1}) + \sigma^2 d_k,$$

where  $\mathbf{M}_{k-1} = \mathbf{f}_k^+ \mathbf{f}_k \mathbf{F}_{k-1}^+$ ,  $d_k = \mathbf{f}_k^{+T} \mathbf{f}_k^+$ . If  $\mathbf{f}_k$  is nonzero then  $d_k = \mathbf{f}_k^{+T} \mathbf{f}_k^+ > 0$ .

For a non-zero  $\mathbf{M}_{k-1}$  we have  $\text{trace}(\mathbf{M}_{k-1}^T \mathbf{M}_{k-1}) > 0$ . Therefore, the value of the stochastic component of the error increases with increasing  $k$ .

For the deterministic component of the true signal recovery error, the recursive expression has the form:

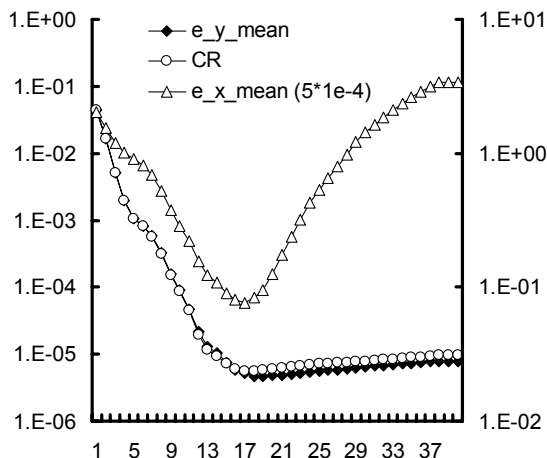
$$e_{xd}(k) = \mathbf{x}^T \mathbf{x} - \mathbf{x}^T \mathbf{F}_k^+ \mathbf{F}_k \mathbf{x} = e_{xd}(k-1) - \mathbf{x}^T \mathbf{f}_k^+ \mathbf{f}_k (\mathbf{I} - \mathbf{F}_{k-1}^+ \mathbf{F}_{k-1}) \mathbf{x}.$$

As shown in [25], the matrix  $\mathbf{f}_k^+ \mathbf{f}_k (\mathbf{I} - \mathbf{F}_{k-1}^+ \mathbf{F}_{k-1})$  can be obtained by the product of the column-vector  $(\mathbf{f}_k (\mathbf{I} - \mathbf{F}_{k-1}^+ \mathbf{F}_{k-1}))^T$  and the same (not transposed) row vector divided by the square of its norm. Therefore, for non-orthogonal  $\mathbf{x}$  and  $\mathbf{f}_k (\mathbf{I} - \mathbf{F}_{k-1}^+ \mathbf{F}_{k-1})$ , the value of the deterministic component of the true signal recovery error decreases with increasing  $k$ .

An experimental study demonstrating a decrease in the deterministic component and an increase in the stochastic component of  $e_y$ , the proximity of the global minima of the  $e_x(k)$  и  $e_y(k)$  dependences, was carried out in [25]. The criterion for selecting the model  $\mathbf{x}_{kR}^*$  when solving DIP based on random projection, which is an approximation of the output vector recovery error  $e_y$ , was obtained in [26]:

$$CR_Q = E \left\| (\mathbf{A} \mathbf{F}_k^+ \mathbf{Q}_k^T - \mathbf{I}) \mathbf{y} \right\|^2 - \sigma^2 \text{trace}((\mathbf{A} \mathbf{F}_k^+ \mathbf{Q}_k^T - \mathbf{I})^T (\mathbf{A} \mathbf{F}_k^+ \mathbf{Q}_k^T - \mathbf{I})) + \\ + \sigma^2 \text{trace}(\mathbf{F}_k^{+T} \mathbf{A}^T \mathbf{A} \mathbf{F}_k)$$

Fig. 4 shows graphs of the values of the  $CR_Q$  criterion, the average output recovery error ( $e_y^{\text{mean}}$ ), and the average true signal recovery error ( $e_x^{\text{mean}}$ ) vs  $k$  for the Carasso problem. The graph lines corresponding to the  $CR_Q$  criterion and the average recovery error of  $\mathbf{y}_0$  are close, so the MSC  $CR_Q$  well approximates the recovery error of the output  $\mathbf{y}_0$ . The positions of the minima are also close.



**Fig. 4.** Dependences of  $CR_Q(k)$ ,  $e_x(k)$  and  $e_y(k)$ , for the noise level of  $5 \times 10^{-4}$

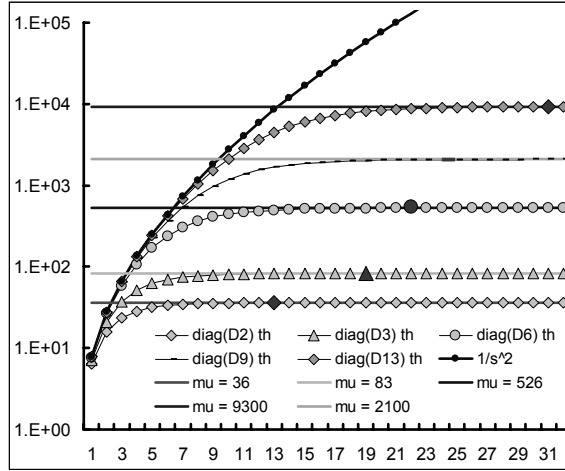
**Reducing the input vector recovery error.** The accuracy of the DIP solution by the method of random projection depends on two independent random variables. The first one is the additive noise in the output vector (whose distribution is assumed to be Gaussian, and the variance is generally unknown) and the second one is the random variable that forms the random matrix (Gaussian distribution with the unit variance, in the studied case). Changing the number of rows  $k$  of the random matrix leads to a change in the accuracy of the DIP solution. In the absence of noise in the output vector, an increase in the number of rows of a random matrix leads to a decrease in the solution error. Noise in the output vector leads to the appearance of an error component, the value of which increases with increasing number of rows of a random matrix. Therefore, the dependence of the error of the DIP solution on the number of rows of the random matrix has a minimum at  $k < N$  (at certain noise levels). In order to make the dependence of the error on the number of the random matrix rows more smooth and thereby facilitate the search for the minimum, in [22], [23], [24], [25], [26] we performed averaging over noise in the output vector. Experimental studies [23], [26] showed that averaging over random matrices leads to a smoothing of the  $e_R(k)$  dependence and a decrease in the number of local minima. Analytic averaging over random matrices can lead to simpler expressions for  $e_R(k)$ , facilitate further analytical research and improve the accuracy of the method of DIP solving based on random projection.

In [34] important results were obtained related to averaging (finding the expectation) over random matrices  $\mathbf{R}_k$  of expressions of the form:

$$E_R \{ \mathbf{R}_k^T (\mathbf{R}_k \mathbf{B} \mathbf{R}_k^T)^{-1} \mathbf{R}_k \}, E_R \{ \mathbf{R}_k^T (\mathbf{R}_k \mathbf{Z} \mathbf{R}_k^T)^{-1} \mathbf{R}_k \},$$

where  $\mathbf{B} \in \mathfrak{R}^{N \times N}$  is any symmetric positive semidefinite matrix,  $\mathbf{Z} \in \mathfrak{R}^{N \times N}$  is the diagonal matrix of the eigenvalues of the matrix  $\mathbf{B}$ . In particular,

$$E_R \{ \mathbf{R}_k^T (\mathbf{R}_k \mathbf{B} \mathbf{R}_k^T)^{-1} \mathbf{R}_k \} = \mathbf{U} E_R \{ \mathbf{R}_k^T (\mathbf{R}_k \mathbf{Z} \mathbf{R}_k^T)^{-1} \mathbf{R}_k \} \mathbf{U}^T.$$



**Fig. 5.** Theoretical values of the elements of the diagonal of the matrix  $\mathbf{D}_k$  for the Carasso problem

For the structure of the form  $\mathbf{R}_k^T(\mathbf{R}_k\mathbf{Z}\mathbf{R}_k^T)^{-1}\mathbf{R}_k$ , in [34] it is shown that

$$E_R\{\mathbf{R}_k^T(\mathbf{R}_k\mathbf{Z}\mathbf{R}_k^T)^{-1}\mathbf{R}_k\} = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_m, \dots, \mu, \dots, \mu) \equiv \mathbf{D}_k(\mathbf{Z}_m),$$

that is,  $\mathbf{D}_k(\mathbf{Z}_m)$  ( $N \times N$ ) is diagonal, where  $\lambda_i = \mu/(1 + \mu s_i^2)$ ,  $\mu = \text{const}$ .

Averaging over random matrices leads to the diagonalization of the matrix included in both error components (deterministic and stochastic).

An experimental study of  $\mathbf{D}_k(\mathbf{Z}_m)$  showed that the sequence  $\lambda_1, \dots, \lambda_m$  is bounded by the sequence  $s_1^{-2}, \dots, s_m^{-2}$  from above and that several initial values of the diagonal of the matrix  $\mathbf{D}_k$  approach  $s_i^{-2}$  with great accuracy. For example, for the Carasso problem the values of the diagonal elements of the matrix  $\mathbf{D}_k$  for  $k = \{2, 3, 6, 9, 13\}$  are shown in Fig. 5, where  $s_i^{-2}$  and  $\mu$  are also shown. The values of the diagonal elements vary monotonically with  $k$ . This leads to a smoothing of the  $e_x(k)$  and  $e_y(k)$  dependences and to a decrease in the number of local minima. The results of an experimental study showed the connection of the element values of the diagonalized matrix with the singular values of the original one, which creates the basis for the study of the relationship of the truncated SVD and random projection.

To average the  $e_x$  error over random matrices, the error components were transformed so that they include the matrix structure of the form  $\mathbf{R}_k^T(\mathbf{R}_k\mathbf{A}\mathbf{A}^T\mathbf{R}_k^T)^{-1}\mathbf{R}_k$  and then averaging was performed:

$$E_R\{e_x\} = E_R\{e_{x_d}\} + E_R\{e_{x_s}\} = \mathbf{x}^T\mathbf{x} - \mathbf{x}^T\mathbf{A}^TE_R\{\mathbf{R}_k^T(\mathbf{R}_k\mathbf{A}\mathbf{A}^T\mathbf{R}_k^T)^{-1}\mathbf{R}_k\}\mathbf{A}\mathbf{x} + \\ + \sigma^2 \text{trace } E_R\{\mathbf{R}_k^T(\mathbf{R}_k\mathbf{A}\mathbf{A}^T\mathbf{R}_k^T)^{-1}\mathbf{R}_k\},$$

$$E_R\{e\} = \mathbf{x}^T\mathbf{x} - \mathbf{x}^T\mathbf{V}\mathbf{S}^2\mathbf{D}_k\mathbf{V}^T\mathbf{x} + \sigma^2 \text{trace}(\mathbf{U}\mathbf{D}_k\mathbf{U}^T).$$

The resulting expression for  $E_R\{e\}$  does not allow us to identify the entire structure of the error. The bias and variance of error that appear due to averaging over the realizations of the random matrix are not explicitly presented and therefore cannot be analyzed. In [33] expressions for the error were obtained in a form that allows us to propose a method for solving the DIP with a reduced error with respect to the random projection method [23], [25]. By analogy with the works that studied bias and variance of the error arising due to the presence of additive noise in the output vector, we call the component  $e_{RB} = \|\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}\|^2$  as the squared bias, and  $e_{RV} = \|\bar{\mathbf{x}} - (\mathbf{R}_k \mathbf{A})^+ \mathbf{R}_k \mathbf{b}\|^2$  as the variance of the vector  $\mathbf{x}$  (input) recovery when averaged over random matrices  $\mathbf{R}_k$ . In [33], the bias and variance components were obtained by averaging the error  $e_x$  over the realizations of the random matrix  $\mathbf{R}_k$ . Bias and variance of the input vector recovery error are

$$e_{RV} = \mathbf{b}^T \mathbf{U} \mathbf{D}_k \mathbf{U}^T \mathbf{b} - \|\mathbf{A}^T \mathbf{U} \mathbf{D}_k \mathbf{U}^T \mathbf{b}\|^2, \quad e_{RB} = \|\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}\|^2 = \|\mathbf{x} - \mathbf{A}^T \mathbf{U} \mathbf{D}_k \mathbf{U}^T \mathbf{b}\|^2,$$

where  $\bar{\mathbf{x}} = E_R\{(\mathbf{R}_k \mathbf{A})^+ \mathbf{R}_k \mathbf{b}\} = \mathbf{A}^T \mathbf{U} \mathbf{D}_k \mathbf{U}^T \mathbf{b}$ .

The input vector  $\mathbf{x}$  recovery error, averaged over random matrices is

$$E_R\{e_R\} = e_{RB} + e_{RV} = \|\mathbf{x} - \mathbf{A}^T \mathbf{U} \mathbf{D}_k \mathbf{U}^T \mathbf{b}\|^2 + \mathbf{b}^T \mathbf{U} \mathbf{D}_k \mathbf{U}^T \mathbf{b} - \|\mathbf{A}^T \mathbf{U} \mathbf{D}_k \mathbf{U}^T \mathbf{b}\|^2.$$

From the expression for  $E_R\{e_R\}$  it can be seen that the recovery error of the input vector without averaging over noise can be reduced by the variance value  $e_{RV}$  (resulting from multiplication by a random matrix and subsequent averaging). To do this, the recovery of the input vector should be performed as  $\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{A}^T \mathbf{U} \mathbf{D}_k \mathbf{U}^T \mathbf{b}$ , where  $\mathbf{U}$  was obtained from SVD-decomposition  $\mathbf{A} = \mathbf{A} \mathbf{S} \mathbf{V}^T$ , and  $\mathbf{D}_k$  was obtained as  $E_R\{\mathbf{R}_k^T (\mathbf{R}_k \mathbf{S}^2 \mathbf{R}_k^T)^{-1} \mathbf{R}_k\} = \mathbf{D}_k$ . Indeed, this gives us an error that coincides with the squared bias in  $E_R\{e_R\}$ :

$$e_{DR} = \|\mathbf{x} - \tilde{\mathbf{x}}\|^2 = \|\mathbf{x} - \mathbf{A}^T \mathbf{U} \mathbf{D}_k \mathbf{U}^T \mathbf{b}\|^2.$$

Let us call the method of solving DIP according to  $\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{A}^T \mathbf{U} \mathbf{D}_k \mathbf{U}^T \mathbf{b}$  as the deterministic method based on analytical averaging of random projection (DRP). From expression  $e_{DR}$  it can be seen that the error of the input vector recovery, when noise-averaged

$$E_\varepsilon\{E_R\{e_R\}\} = E_\varepsilon\{e_{RB}\} + E_\varepsilon\{e_{RV}\} = E_\varepsilon\{\|\mathbf{x} - \mathbf{A}^T \mathbf{U} \mathbf{D}_k \mathbf{U}^T \mathbf{b}\|^2\} + \\ + E_\varepsilon\{\mathbf{b}^T \mathbf{U} \mathbf{D}_k \mathbf{U}^T \mathbf{b} - \|\mathbf{A}^T \mathbf{U} \mathbf{D}_k \mathbf{U}^T \mathbf{b}\|^2\}$$

is greater than the error  $e_{DR}$ , when noise-averaged averaged, i.e.

$$E_\varepsilon\{e_{DR}\} = E_\varepsilon\{\|\mathbf{x} - \tilde{\mathbf{x}}\|^2\} = E_\varepsilon\{\|\mathbf{x} - \mathbf{A}^T \mathbf{U} \mathbf{D}_k \mathbf{U}^T \mathbf{b}\|^2\}.$$

A function approximating the output vector recovery error of the DRP method was obtained in [33]:

$$CR_{DR} = E_{\varepsilon} \{ \|(\mathbf{A}\mathbf{A}^T \mathbf{U}_k \mathbf{U}^T - \mathbf{I})\mathbf{b}\|^2 \} - \sigma^2 \text{trace}((\mathbf{A}\mathbf{A}^T \mathbf{U}_k \mathbf{U}^T - \mathbf{I})^T (\mathbf{A}\mathbf{A}^T \mathbf{U}_k \mathbf{U}^T - \mathbf{I})) + \\ + \sigma^2 \text{trace}((\mathbf{A}\mathbf{A}^T \mathbf{U}_k \mathbf{U}^T)^T \mathbf{A}\mathbf{A}^T \mathbf{U}_k \mathbf{U}^T).$$

Averaging over random matrices leads to further smoothing the dependence of the error on the size  $k$  of the random matrix [23], [26].

Analytical averaging over random matrices allowed us to analyze the bias and variance of errors that appear due to averaging over the realizations of the random matrix, and to obtain an estimate of the input vector that provides greater accuracy of the DIP solution relative to the estimate obtained by averaging both over noise and over the matrices.

An experimental study [33] showed that the proposed estimate of the input vector provides a solution accuracy that is very close to the accuracy of the truncated singular value decomposition method. However the dependence of the error on  $k$  is smoother than for the truncated singular value decomposition. It is assumed that the resulting smoothness can be used to improve the accuracy of the DIP solution in real problems due to a more accurate choice of the optimal dimension of the model by the model selection criteria.

## CONCLUSIONS

This article provides an overview of some of the research of the International Center in the field of neural network distributed representations. The formation of distributed representations from the original vector representations of objects using random projection is considered. Distributed representations allow one to efficiently estimate the similarity of the original objects. They can also be used in linear classifiers to perform an effective classification of objects whose representations are not linearly separable in the input space [37], [38], [39], [40]. The use of distributed representations formed by random projection allows increasing the computational efficiency and accuracy of information technologies based on solving discrete ill-posed problems [41], [42]. The solution accuracy of discrete ill-posed problems was investigated analytically, [25], [26], [33]. These developments are protected by three patents.

We note, however, that distribution representations include not only random projection based methods [15], [16], [17], [18], [43], [44], [45] but also a number of other representation schemes for vectors, such as those based on receptive fields of other types [46] or compositional methods [47], [48], [49], [50]. DRs can be used to represent certain types of images using a special type of LiRA receptive fields [51], [52], [53]. One of the promising research directions could consist in using DRs in the texture segmentation problem [54], [55], [56] and in classification of satellite optical and SAR images [57], [58], [59].

For a long time it was believed that the main drawback of distributed representations is the inability to represent structure. Recently, however, DRs have been developed for complexly structured representations of objects, such as sequences [60], [61], [62], [63], [64] or graphs of situations (episodes) of knowledge bases, etc., e.g. [65], [66], [7], [8], [3].

Thus, distributed representations built on the basis of ideas about the representation of information in the brain, when used in information technologies, increase their computational efficiency by converting data of different types — both unstructured information in the form of vector arrays and relational structures of knowledge bases — into a special format of vectors. In addition, distributed representations allow naturally combining information about structure and semantics, giving a basis for creating computationally efficient and qualitatively new information technologies for processing relational structures from data and knowledge bases. The neurobiological relevance of distributed representations opens the way to the creation on their basis of intelligent information technologies that function similarly to the human brain.

## REFERENCES

1. Amosov N. M. Modelling of thinking and the mind. New York: Spartan Books, 1967. 192 p.
2. Amosov N.M., Baidyk T.N., Goltsev A.D., Kasatkin A.M., Kasatkina L.M., Rachkovskij D.A. Neurocomputers and Intelligent Robots. Kyiv: Nauk. Dumka. 1991. 269 p. (in Russian)
3. Gritsenko V.I., Rachkovskij D.A., Goltsev A.D., Lukovych V.V., Misuno I.S., Revunova E.G., Slipchenko S.V., Sokolov A.M., Talayev S.A. Neural distributed representation for intelligent information technologies and modeling of thinking. *Kibernetika i vychislitel'naâ tehnika*. 2013. Vol. 173. P. 7–24. (in Russian)
4. Goltsev A.D., Gritsenko V.I. Neural network technologies in the problem of handwriting recognition. *Control Systems and Machines*. 2018. N 4. P. 3–20. (in Russian).
5. Kussul E.M. Associative neuron-like structures. Kyiv: Nauk. Dumka. 1992. 144 p. (in Russian)
6. Kussul E.M., Rachkovskij D.A., Baidyk T.N. Associative-Projective Neural Networks: Architecture, Implementation, Applications. *Proc. Neuro-Nimes'91*. (Nimes, 25–29<sup>th</sup> of Oct. 25–29, 1991). Nimes, 1991. P. 463–476.
7. Gayler R. Multiplicative binding, representation operators, and analogy. *Advances in Analogy Research: Integration of Theory and Data from the Cognitive, Computational, and Neural Sciences*. Edited by K. Holyoak, D. Gentner, and B. Kokinov. Sofia, Bulgaria: New Bulgarian University, 1998. P. 405.
8. Kanerva P. Hyperdimensional computing: An introduction to computing in distributed representation with high-dimensional random vectors. *Cognitive Computation*. 2009. Vol. 1, N 2. P. 139–159.
9. Goltsev A., Husek D. Some properties of the assembly neural networks. *Neural Network World*. 2002. Vol. 12, N. 1. P. 15–32.
10. Goltsev A.D. Neural networks with assembly organization. Kyiv: Nauk. Dumka. 2005. 200 p. (in Russian)
11. Goltsev A., Gritsenko V. Modular neural networks with radial neural columnar architecture. *Biologically Inspired Cognitive Architectures*. 2015. Vol. 13. P. 63–74.
12. Frolov A.A., Rachkovskij D.A., Husek D. On information characteristics of Willshaw-like auto-associative memory. *Neural Network World*. 2002. Vol. 12, No 2. P. 141–158.
13. Frolov A.A., Husek D., Rachkovskij D.A. Time of searching for similar binary vectors in associative memory. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2006. Vol. 42, N 5. P. 615–623.
14. Gritsenko V.I., Rachkovskij D.A., Frolov A.A., Gayler R., Kleyko D., Osipov E. Neural distributed autoassociative memories: A survey. *Kibernetika i vychislitel'naâ tehnika*. 2017. N 2 (188). P. 5–35.
15. Li P., Hastie T.J., Church K.W. Very sparse random projections. *Proc. KDD'06*. (Philadelphia, 20 – 23<sup>th</sup> of Aug.). Philadelphia, 2006. P. 287–296.
16. Rachkovskij D.A. Vector data transformation using random binary matrices. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2014. Vol. 50, N 6. P. 960–968.



17. Rachkovskij D.A. Formation of similarity-reflecting binary vectors with random binary projections. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2015. Vol. 51, N 2. P. 313–323.
18. Rachkovskij D.A. Estimation of vectors similarity by their randomized binary projections. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2015. Vol. 51, N 5. P. 808–818.
19. Revunova E.G., Rachkovskij D.A. Using randomized algorithms for solving discrete ill-posed problems. *Intern. Journal Information Theories and Applications*. 2009. Vol. 16, N 2. P. 176–192.
20. Durrant R.J., Kaban A. Random projections as regularizers: learning a linear discriminant from fewer observations than dimensions. *Machine Learning*. 2015. Vol. 99, N 2. P. 257–286.
21. Xiang H., Zou J. Randomized algorithms for large-scale inverse problems with general Tikhonov regularizations. *Inverse Problems*. 2015. Vol. 31, N 8: 085008. P. 1–24.
22. Revunova E.G. Study of error components for solution of the inverse problem using random projections. *Mathematical Machines and Systems*. 2010. N 4. P. 33–42 (in Russian).
23. Rachkovskij D.A., Revunova E.G. Randomized method for solving discrete ill-posed problems. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2012. Vol. 48, N. 4. P. 621–635.
24. Revunova E.G. Randomization approach to the reconstruction of signals resulted from indirect measurements. *Proc. ICIM'13* (Kyiv 16–20<sup>th</sup> of Sept., 2013). Kyiv, 2013. P. 203–208.
25. Revunova E.G. Analytical study of the error components for the solution of discrete ill-posed problems using random projections. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2015. Vol. 51, N. 6. P. 978–991.
26. Revunova E.G. Model selection criteria for a linear model to solve discrete ill-posed problems on the basis of singular decomposition and random projection. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2016. Vol. 52, N.4. P. 647–664.
27. Revunova E.G. Averaging over matrices in solving discrete ill-posed problems on the basis of random projection. *Proc. CSIT'17* (Lviv 05–08<sup>th</sup> of Sept., 2017). Lviv, 2017. Vol. 1. P. 473–478.
28. Revunova E.G. Solution of the discrete ill-posed problem on the basis of singular value decomposition and random projection. *Advances in Intelligent Systems and Computing II*. Cham: Springer. 2018. P. 434–449.
29. Hansen P. Rank-deficient and discrete ill-posed problems. Numerical aspects of linear inversion. Philadelphia: SIAM, 1998. 247 p.
30. Nowicki D., Verga P., Siegelmann H. Modeling reconsolidation in kernel associative memory. *PLoS ONE*. 2013. Vol. 8(8): e68189. doi:10.1371/journal.pone.0068189.
31. Nowicki D., Siegelmann H. Flexible kernel memory. *PLoS ONE*. 2010. Vol. 5(6): e10955. doi:10.1371/journal.pone.0010955.
32. Revunova E.G., Tyshchuk A.V. A model selection criterion for solution of discrete ill-posed problems based on the singular value decomposition. *Proc. IWIM'2015* (20–24<sup>th</sup> of July, 2015, Kyiv-Zhukin). Kyiv-Zhukin, 2015. P.43–47.
33. Revunova E.G. Improving the accuracy of the solution of discrete ill-posed problem by random projection. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2018. Vol. 54, N 5. P. 842–852.
34. Marzetta T., Tucci G., Simon S. A random matrix-theoretic approach to handling singular covariance estimates. *IEEE Trans. Information Theory*. 2011. Vol. 57, N 9. P. 6256–6271.
35. Stepashko V. Theoretical aspects of GMDH as a method of inductive modeling. *Control systems and machines*. 2003. N 2. P. 31–38. (in Russian)
36. Stepashko V. Method of critical variances as analytical tool of theory of inductive modeling. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2008. Vol. 40, N 3. P. 4–22.
37. Kussul E.M., Baidyk T.N., Lukovich V.V., Rachkovskij D.A. Adaptive neural network classifier with multifold input coding. *Proc. Neuro-Nimes'93* (25–29<sup>th</sup> of Oct., 1993, Nimes). Nimes, France, 1993 P. 209–216.
38. Lukovich V.V., Goltsev A.D., Rachkovskij D.A. Neural network classifiers for micromechanical equipment diagnostics and micromechanical product quality inspection. *Proc. EUFIT'97* (8–11<sup>th</sup> of Sept, 1997, Aachen). Aachen, Germany, 1997. P. 534–536.
39. Kussul E.M., Kasatkina L.M., Rachkovskij D.A., Wunsch D.C. Application of random threshold neural networks for diagnostics of micro machine tool condition. *Proc. IJCNN'01* (4–9<sup>th</sup> of May, 1998, Anchorage). Anchorage, Alaska, USA, 1998 P. 241–244.

40. Gol'tsev A.D. Structured neural networks with learning for texture segmentation in images. *Cybernetics and Systems Analysis*. 1991. Vol. 27, N 6. P. 927–936.
41. Rachkovskij D.A., Revunova E.G. Intelligent gamma-ray data processing for environmental monitoring. In: *Intelligent Data Processing in Global Monitoring for Environment and Security*. Kyiv-Sofia: ITHEA. 2011. P. 136–157.
42. Revunova E.G., Rachkovskij D.A. Random projection and truncated SVD for estimating direction of arrival in antenna array. *Kibernetika i vychislitel'nââ tehnika*. 2018. N 3(193). P. 5–26.
43. Ferdowsi S., Voloshynovskiy S., Kostadinov D., Holotyak T. Fast content identification in highdimensional feature spaces using sparse ternary codes. *Proc. WIFS'16* (4–7<sup>th</sup> of Dec., 2016, Abu Dhabi) Abu Dhabi, UAE, 2016. P. 1–6.
44. Dasgupta S., Stevens C.F., Navlakha S. A neural algorithm for a fundamental computing problem. *Science*. 2017. Vol. 358(6364). P. 793–796.
45. Iclanzan D., Szilagyî S.M., Szilagyî L.. Evolving computationally efficient hashing for similarity search. *Proc. ICONIP'18*. 2. (Siem Reap, 15–18<sup>th</sup> of Dec., 2018). Siem Reap, Cambodia, 2018. 2018.
46. Rachkovskij D.A., Slipchenko S.V., Kussul E.M., Baidyk T.N. Properties of numeric codes for the scheme of random subspaces RSC. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2005. Vol. 41, N. 4. P. 509–520.
47. Rachkovskij D.A., Slipchenko S.V., Kussul E.M., Baidyk T.N. Sparse binary distributed encoding of scalars. 2005. *Journal of Automation and Information Sciences*. Vol. 37, N 6. P. 12–23.
48. Rachkovskij D.A., Slipchenko S.V., Misuno I.S., Kussul E.M., Baidyk T. N. Sparse binary distributed encoding of numeric vectors. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2005. Vol. 37, N 11. P. 47–61.
49. Kleyko D., Osipov E., Rachkovskij D.A. Modification of holographic graph neuron using sparse distributed representations. *Procedia Computer Science*. 2016. Vol. 88. P. 39–45.
50. Kleyko D., Rahimi A., Rachkovskij D., Osipov E., Rabaey J. Classification and recall with binary hyperdimensional computing: Tradeoffs in choice of density and mapping characteristics. *IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst*. 2018.
51. Kussul E., Baidyk T., Kasatkina L. Lukovich V. Rosenblatt perceptrons for handwritten digit recognition. *Proc. IJCNN'01*. (Washington, 15–19 July, 2001). Washington, USA. 2001. P. 1516–1521.
52. Baidyk T., Kussul E., Makeyev O., Vega A., Limited receptive area neural classifier based image recognition in micromechanics and agriculture. *International Journal of Applied Mathematics and Informatics*. 2008. Vol. 2, N 3. P. 96–103.
53. Baydyk T., Kussul E., Hernández Acosta M. LIRA neural network application for microcomponent measurement. *International Journal of Applied Mathematics and Informatics*. Vol.6, N 4. 2012. P.173–180.
54. Goltsev A.D., Gritsenko V.I. Algorithm of sequential finding the textural features characterizing homogeneous texture segments for the image segmentation task. *Kibernetika i vychislitel'nââ tehnika*. 2013. N 173. P. 25–34 (in Russian).
55. Goltsev A., Gritsenko V., Kussul E., Baidyk T. Finding the texture features characterizing the most homogeneous texture segment in the image. *Proc. IWANN'15*. (Palma de Mallorca, Spain, June 10–12, 2015). Palma de Mallorca, 2015. 2015. P. 287–300.
56. Goltsev A., Gritsenko V., Husek D. Extraction of homogeneous fine-grained texture segments in visual images. *Neural Network World*. 2017. Vol. 27, N 5. P. 447– 477.
57. Kussul N.N., Sokolov B.V., Zyelyk Y.I., Zelentsov V.A., Skakun S.V., Shelestov A.Y. Disaster risk assessment based on heterogeneous geospatial information. *J. of Automation and Information Sci.* 2010. Vol. 42, N 12. P. 32–45.
58. Kussul N., Lemoine G., Gallego F. J., Skakun S. V, Lavreniuk M., Shelestov A. Y. Parcel-based crop classification in Ukraine using Landsat-8 data and Sentinel-1A data. *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens*. 2016. Vol. 9, N 6. P. 2500–2508.
59. Kussul N., Lavreniuk M., Shelestov A., Skakun S. Crop inventory at regional scale in Ukraine: developing in season and end of season crop maps with multi-temporal optical and SAR satellite imagery. *European Journal of Remote Sensing*. 2018. Vol. 51, N 1. P. 627–636.

60. Sokolov A., Rachkovskij D. Approaches to sequence similarity representation. *Information Theories and Applications*. 2005. Vol.13, N 3. P. 272–278.
61. Recchia G., Sahlgren M., Kanerva P., Jones M. Encoding sequential information in semantic space models: Comparing holographic reduced representation and random permutation. *Comput. Intell. Neurosci.* 2015. Vol. 2015. Art. 986574. P. 1–18.
62. Räsänen O.J., Saarinen J.P. Sequence prediction with sparse distributed hyperdimensional coding applied to the analysis of mobile phone use patterns. *IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst.* 2016. Vol. 27, N 9. P. 1878–1889.
63. Gallant S.I., Culliton P. Positional binding with distributed representations. *Proc. ICIVC'16*. (Portsmouth, UK 3–5 Aug., 2016). Portsmouth, 2016. 2016. P. 108–113.
64. Frady E. P., Kleyko D., Sommer F. T. A theory of sequence indexing and working memory in recurrent neural networks. *Neural Comput.* 2018. Vol. 30, N. 6. P. 1449–1513.
65. Rachkovskij D.A. Some approaches to analogical mapping with structure sensitive distributed representations. *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*. 2004. Vol. 16, N 3. P. 125–145.
66. Slipchenko S.V., Rachkovskij D.A. Analogical mapping using similarity of binary distributed representations. *Int. J. Information Theories and Applications*. 2009. Vol. 16, N 3. P. 269–290.

Received 22.08.2018

Гриценко В.І., член-кореспондент НАН України,  
директор Міжнародного науково-навчального центру  
інформаційних технологій та систем НАН України та МОН України  
e-mail: vig@irtc.org.ua

Рачковський Д.А., д-р техн. наук, пров. наук. співроб.  
відд. нейромережових технологій оброблення інформації,  
e-mail: dar@infrm.kiev.ua

Ревунова О.Г., канд. техн. наук, старш. наук. співроб.  
відд. нейромережових технологій оброблення інформації,  
e-mail: egrevunova@gmail.com

Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій  
та систем НАН України та МОН України,  
пр. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна

## НЕЙРОМЕРЕЖЕВІ РОЗПОДІЛЕНІ ПОДАННЯ ВЕКТОРНИХ ДАНИХ У ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

**Вступ.** Розподілене подання (РП) даних — форма векторного подання, де кожний об'єкт надано безліччю компонентів вектора і кожний компонент вектора може належати поданню багатьох об'єктів. Це нейромережовий підхід, оснований на моделюванні подання інформації в мозку, до якого привели ідеї про "розподілене" або "голографічне" подання. РП мають велику інформаційну ємкість, дають змогу застосовувати багатий арсенал методів, розроблених для векторних даних, добре масштабуються для оброблення великих обсягів даних, мають низку інших переваг. Методи перетворення в РП розроблено для даних різного типу — від скалярних і векторних до графів.

**Мета статті** — надати опис частини робіт відділу нейромережових технологій оброблення інформації Міжнародного Центру в галузі нейромережового розподіленого подання. Підхід є розвитком ідей академіка М.М. Амосова і його наукової школи про моделювання структури і функцій мозку.

**Результати.** Розглянуто формування розподіленого подання з початкового векторного подання об'єктів за допомоги випадкового проектування. За допомоги РП можна ефективно оцінювати схожість початкових об'єктів — числових векторів, що дає змогу розробляти методи регуляризації для отримання стійкого рішення дискретних некорек-

тних обернених задач, підвищити обчислювальну ефективність і точність їх розв'язання, аналітично досліджувати точність рішення.

**Висновки.** РП даних різних типів може бути використано для підвищення ефективності та рівня інтелектуальності інформаційних технологій. Розроблено РП як для слабо структурованих даних (вектори), так і для складно структурованого подання об'єктів (послідовності, граfi ситуацій (епізодів) баз знань тощо). Перетворення різнотипних даних в векторний формат РП дає змогу уніфікувати базові інформаційні технології їх оброблення та домогтися надійної масштабованості зі збільшенням обсягів оброблюваних даних.

**Ключові слова:** розподілене подання даних, випадкове проектування, оцінка подібності векторів, дискретна некоректна задача, регуляризація.

Гриценко В.И., член-корреспондент НАН Украины,  
директор Международного научно-учебного центра  
информационных технологий и систем  
НАН Украины и МОН Украины  
e-mail: vig@irtc.org.ua

Рачковский Д.А., д-р техн. наук, вед. науч. сотр.  
отд. нейросетевых технологий обработки информации  
e-mail: dar@infrm.kiev.ua

Ревунова Е.Г., канд. техн. наук,  
старш. науч. сотр.  
отд. нейросетевых технологий обработки информации  
e-mail: egrevunova@gmail.com

Международный научно-учебный центр информационных  
технологий и систем НАН Украины и МОН Украины,  
пр. Акад. Глушкова, 40, г. Киев, 03187, Украина

#### НЕЙРОСЕТЕВЫЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ВЕКТОРНЫХ ДАННЫХ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

В статье дан обзор части работ отдела нейросетевых технологий обработки информации Международного Центра в области нейросетевых распределенных представлений. Подход является развитием идей Н.М. Амосова и его научной школы о моделировании структуры и функций мозга. Распределенные представления данных различных типов могут быть использованы для повышения эффективности и уровня интеллектуальности информационных технологий. Разработаны РП как для слабо структурированных данных (векторы), так и для сложно структурированных представлений объектов (последовательности, графы ситуаций (эпизодов) баз знаний, и др.). Преобразование разнотипных данных в векторный формат РП позволяет унифицировать базовые информационные технологии их обработки и добиться масштабируемости с увеличением объемов обрабатываемых данных. В перспективе распределенные представления позволяют соединить информацию о структуре и семантике для создания вычислительно эффективных и качественно новых ИТ, в которых обработка реляционных структур из баз знаний выполняется по сходству их РП.

**Ключевые слова:** распределенное представление данных, случайное проецирование, оценка сходства векторов, дискретная некорректная задача, регуляризация.

---

DOI: [https:// 10.15407/kvt194.04.029](https://10.15407/kvt194.04.029)

УДК 004.942:001.57+004.03++519.85+612.

**ЕРМАКОВА И.И.**, д-р. биол. наук, проф.,  
вед. науч. сотр. отд. комплексных исследований информационных технологий  
e-mail: irena.yermakova@gmail.com

**НИКОЛАЕНКО А.Ю.**, науч. сотр.,  
отд. комплексных исследований информационных технологий  
e-mail: n\_nastja@ukr.net

**СОЛОПЧУК Ю.М.**, науч. сотр.,  
отд. комплексных исследований информационных технологий  
**ГРИЦАЮК О.В.**, инж.-прогр. I кат.,

отд. комплексных исследований информационных технологий  
**ТАДЕЕВА Ю.П.**, канд. техн. наук, старш. науч. сотр.,

отд. комплексных исследований информационных технологий  
Международный научно-учебный центр  
информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины,  
пр. Акад. Глушкова, 40, 03187, г. Киев, Украина

## **ИНФОРМАЦИОННАЯ СМАРТФОН ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗА СОСТОЯНИЯ ЗДОРОВЬЯ ЧЕЛОВЕКА В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ СРЕДЫ**

---

Предложен новый подход и метод создания смартфон технологии в персонифицированной медицине, в основе которой находится комплекс математических моделей функционального состояния человека в различных условиях. Рассмотрена интеллектуальная информационная технология для смартфона, позволяющая получить прогноз состояния здоровья человека в экстремальных условиях среды. Представлена архитектура клиент-серверного приложения, обеспечивающего многопользовательский доступ к ресурсам и возможностям смартфон технологии. Технология позволяет оценить и предупредить факторы риска здоровья человека в жарких и холодных условиях среды, при повышенной влажности, при попадании в холодную воду, во время выполнения интенсивных физических нагрузок и многое другое.

***Ключевые слова:** смартфон, цифровая медицина, прогнозирование состояния здоровья, мобильное здоровье, экстремальные условия.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время развитие персонифицированной цифровой медицины немыслимо без применения смартфонов [1]. Это предполагает построение и интеграцию информационных платформ, мобильных приложений и порта-

тивных медицинских устройств (гаджетов) с использованием облачных технологий в единую систему [2]. Многие крупные компании создают свои информационные платформы для контроля здорового образа жизни. Прежде всего к ним относятся Google Fit, Samsung S Health, the HealthGraph и Apple Health. Они интегрируют в одной системе имеющиеся приложения, фитнес-трекеры и мобильные медицинские устройства [3]. Наиболее популярными устройствами являются фитнес браслеты и умные часы. Также существуют медицинские устройства, синхронизируемые с мобильными приложениями: кардиомониторы, тонометры, дыхательные аппараты для контроля апноэ, глюкометры и многие другие [4]. Особое место в mHealth технологиях (мобильное здоровье) занимают приложения для смартфонов, позволяющие своевременно оценить функциональное состояние человека с помощью датчиков самого *смартфона*, чаще всего, это пульсометры, оксиметры и измерители артериального давления [5, 6].

Традиционно медицинские информационные платформы состоят из:

- клиентского приложения для смартфона, в функции которого входят сбор и отображение информации, статистических данных, возможных рекомендаций и измерение показателей с помощью датчиков смартфона;
- узкоспециализированных приложений на самом смартфоне для контроля состояния человека;
- умных фитнес устройств;
- мобильных медицинских устройств, отслеживающих физиологические показатели человека.
- сервера, на котором происходит обработка и хранение данных.

В современной мобильной персонифицированной медицине отсутствуют прогнозирующие системы, которые могут оценивать и предотвращать факторы риска здоровья человека в экстремальных условиях среды: жара и холод, повышенная влажность, холодная вода, интенсивные физические нагрузки и многое другое.

В статье предлагается новый подход для смартфон технологии в персонифицированной медицине. Технология основана на применении мультифункциональной сервисной платформы для прогноза состояния человека, находящегося или случайно оказавшегося в экстремальных условиях среды. Мультифункциональная платформа состоит из комплекса информационных модулей. Каждый модуль ориентирован на решение определенного класса теоретических и практических задач, связанных с теплообменом и терморегуляцией человека в зависимости от среды и воздействия [7].

Информационные модули платформы построены на базе комплекса математических моделей, позволяющих получать динамику основных физиологических показателей человека. Модели описывают метаболические процессы, перенос тепла кровью в организме человека, передачу тепла кондукцией между органами и тканями, потоотделение и испарение с поверхности кожи, потери тепла с верхних дыхательных путей, эфферентные и афферентные пути передачи температурных сигналов в гипоталамус и взаимодействие человека с окружающей средой [8].

Объединение возможностей сервисной платформы с современными средствами мобильной медицины позволяет разработать уникальную информационную смартфон систему для оценивания факторов риска здоро-

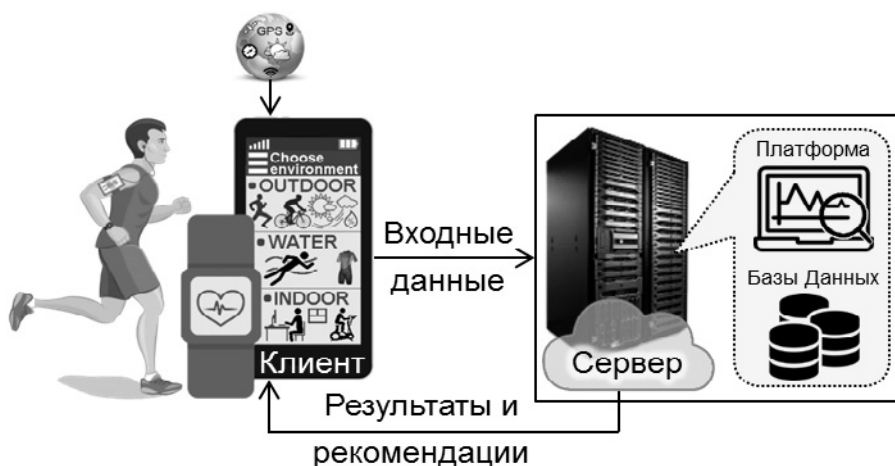
вья человека в различных условиях окружающей среды. Эта система позволяет выполнять сбор персональных данных, объединять полученные данные с другими мобильными приложениями и предоставлять результаты прогнозирования.

**Цель статьи** — разработать интеллектуальную информационную систему с применением смартфон технологий на базе мультифункциональной сервисной платформы для прогноза функционального состояния человека в экстремальных условиях среды.

## АРХИТЕКТУРА КЛИЕНТ-СЕРВЕРНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ

Архитектура интеллектуальной информационной системы имеет клиент-серверное решение, которое предусматривает доступ пользователей через приложение на смартфоне к сервисной платформе, централизованной базе данных и централизованному электронному хранилищу информации (Рис. 1). Под термином «клиент-сервер» здесь подразумевается сетевая архитектура, в которой задания логически распределены между поставщиками услуг, называемыми серверами, и заказчиками услуг, называемыми клиентами [9].

В данном случае «клиент» — это приложение для смартфона, которое взаимодействует с сервером через телекоммуникационную сеть посредством сетевых протоколов. Клиент позволяет выполнять ввод, первичный контроль и передачу данных на сервер, а затем осуществлять прием и отображение результатов на экране смартфона пользователя. На сервере размещено программное обеспечение, которое осуществляет ряд действий по управлению данными (прием, обработка, передача и хранение в соответствующих базах данных), автоматически контролирует целостность и непротиворечивость полученной и хранимой информации, управляет многопользовательским доступом и соблюдает конфиденциальность баз данных, соответствующих разным пользователям, ведет журнал системных событий и др.



**Рис. 1.** Структурная схема смартфон технологии

Во время работы информационной системы между клиентом и сервером осуществляется обмен пакетами данных (при доступном соединении и полученном согласии от пользователя). Клиент направляет запросы по сети серверу и обрабатывает получаемую в ответ информацию. Сервер получает и обрабатывает запросы, предпринимает соответствующие запросам действия и передает клиенту ответные данные.

Отличительная черта разработанной системы — это наличие сервисной платформы для обработки введенных условий и получения прогноза состояния человека. Результаты прогнозирования анализируются и, по результатам анализа, выявляются возможные факторы риска здоровья. На этом основании формируется заключение о резервных возможностях организма либо делается предупреждение об опасности их истощения. Возможность автоматического анализа и принятия решения позволяет классифицировать разрабатываемую систему как интеллектуальную информационную технологию.

## **СТРУКТУРА КЛИЕНТА**

Клиентское приложение написано на языке Java для смартфонов под операционную систему Android. Графический интерфейс состоит из окон для ввода данных и отображения результатов на экране. Интерфейс автоматически адаптируется к размеру экрана смартфона. После установки приложения система просит нового пользователя зарегистрироваться или войти в систему, если пользователь был зарегистрирован ранее. При регистрации система предлагает заполнить анкету с персональными данными для индивидуальной настройки сервисной платформы: имя, дата рождения (для расчета возраста), пол, вес, рост. Пользователь может зарегистрироваться в системе с помощью аккаунтов в социальных сетях Twitter, Facebook, Google+ или электронной почты. В зависимости от профиля социальной сети и разрешения пользователя, система может автоматически получать доступные персональные данные. Включение в систему социальных сетей способствует популяризации приложения.

Для прогнозирования функционального состояния человека используются либо индивидуальные данные, введенные пользователем, либо усредненные показатели. На основании введенных данных веса, роста и пола, рассчитываются индекс массы тела и процентное содержание жировой ткани в организме, что является необходимым для прогноза состояния человека в экстремальных условиях. Меню приложения предоставляет доступ ко всем его функциям: выбор окружающей среды для прогнозирования, ответы на часто задаваемые вопросы, просмотр сохраненных результатов и т.д. (Рис. 2).

Если приложение уже установлено на устройстве и пользователь был зарегистрирован, то при последующих запусках приложения вход в систему происходит автоматически и на экране сразу отображается окно выбора окружающей среды: вода, открытый воздух или помещение. Для каждой среды пребывания закреплено окно ввода исходных данных. Окна ввода исходных данных разделены на области: вид физической активности, ее длительность и интенсивность; одежда или защитное снаряжение; условия среды. Вид физической активности позволяет выбрать: покой, ходьбу, бег,



езду на велосипеде, плавание различными стилями и многое другое. Приложение автоматически получает с погодных сервисов по данным геолокации: текущую температуру, влажность, скорость движения воздуха и температуру воды открытых водоемов. Предоставленная возможность ручного ввода характеристик окружающей среды по желанию пользователя позволяет прогнозировать состояние человека в любых условиях.

Введенные данные передаются на сервер, где обрабатываются сервисной платформой. Предварительный прогноз состояния человека автоматически анализируется, выявляются факторы риска здоровья и отображаются на экране выбранные пользователем показатели (система предлагает пользователю перечень прогнозируемых данных). Затем на сервере формируется и передается клиенту ответ на запрос. Полученный ответ обрабатывается клиентом и отображается в окне результатов прогнозирования.

В настройках приложения пользователь может выбрать интересные показатели его состояния, которые будут получены после обработки исходных данных информационной платформой. В справочной информации приложения подробно описаны все доступные для отображения показатели и их физиологическая роль, такие как общие и локальные температуры, кровотоки, теплопродукции, потери тепла и воды и прочее.

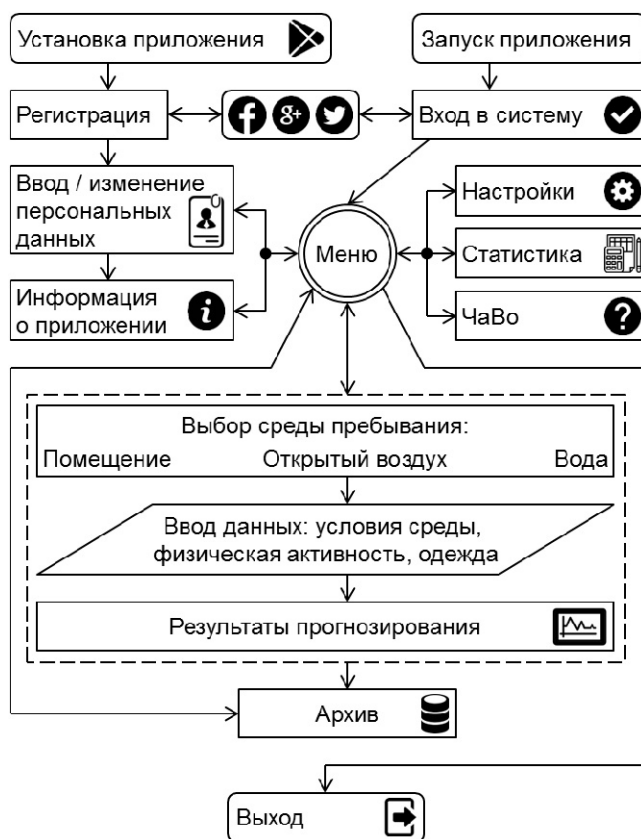


Рис. 2. Блок-схема клиента

На экране смартфона в окне результатов выводятся предупреждение о характере рисков (если таковые обнаружены), практические рекомендации, направленные на упреждение экстремальных воздействий, а также значения физиологических показателей к концу заданного периода времени. По желанию пользователь может просмотреть график изменения выбранного показателя во времени, что позволяет отслеживать переходные процессы и безопасное время пребывания в заданных условиях. Полученные результаты пользователь может сохранить на сервере и посмотреть позже при необходимости.

### СТРУКТУРА СЕРВЕРА

Сервер системы состоит из программы управления потоками данных, сервисной платформы, базы персональных данных и базы сохраненных результатов прогнозирования (“Архив”). После установки соединения на сервер приходит идентификатор (ID) клиента, который сравнивается с ID уже существующих учетных записей. Если записи в системе нет, то происходит регистрация пользователя и в базу данных добавляется новая запись. Если пользователь уже зарегистрирован, то происходит аутентификация (Рис. 3).



Рис. 3. Блок-схема сервера

Сервер допускает одновременное обслуживание большого числа клиентов. Многопользовательский доступ налагает на сервер требования по соблюдению конфиденциальности, разграничению прав пользователей и обеспечению безопасности данных от несанкционированного доступа. Поэтому, после успешной аутентификации пользователя в системе происходит проверка прав. После авторизации сервер предоставляет клиентам доступ к своим ресурсам. Сервер ожидает от клиентских программ запросы и, в зависимости от типа запроса, выполняет следующие функции:

1. Сохранение полученных при регистрации или обновление измененных персональных данных.

2. Обработка сервисной платформой выбранных пользователем условий пребывания и вида физической активности человека, анализ результатов прогнозирования, формирование результатов в зависимости от персональных настроек пользователя и передача ответа клиенту.

3. Формирование и сохранение пользователем результатов прогнозирования в “Архив” сервера.

4. Передача клиенту результатов прогнозирования из “Архива”.

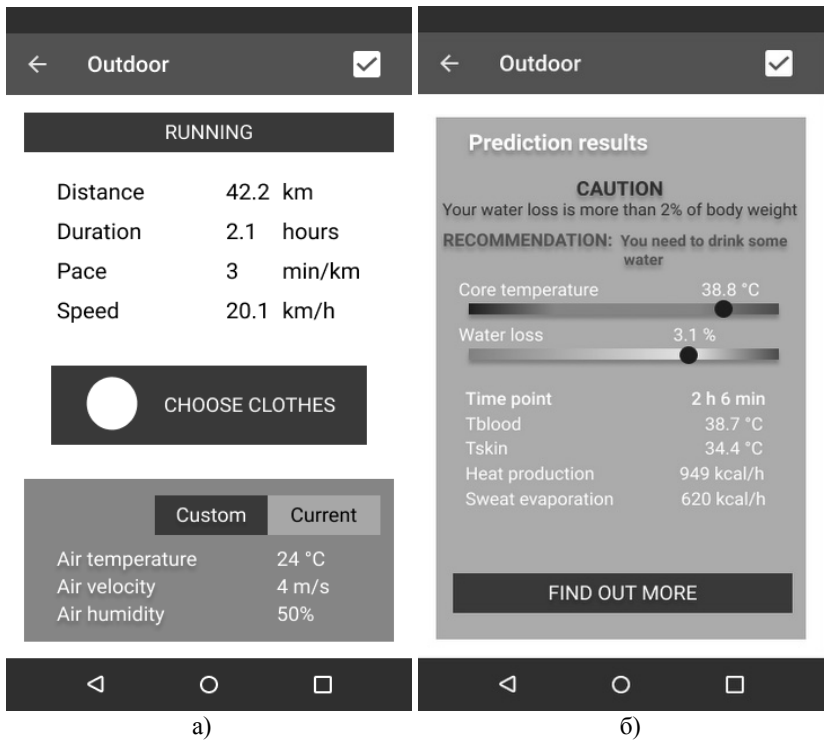
В соответствии с запросом сервер передает клиенту данные либо подтверждение выполненной операции, после чего он возвращается к режиму ожидания запроса от клиента. В случае завершения работы клиента происходит разрыв соединения до следующего запроса на вход в систему.

## **РАБОТА С КЛИЕНТСКИМ ПРИЛОЖЕНИЕМ**

Приложение предназначено для прогноза функционального состояния и оценивания факторов риска здоровья человека в различных условиях среды. Результаты прогнозирования могут быть использованы для решения задач, связанных с поддержанием здорового образа жизни, проверки безопасности условий окружающей среды, подбора одежды и защитного снаряжения, оценивания резервных возможностей организма при физических нагрузках высокой интенсивности и организации подготовительного этапа тренировок спортсменов.

Приложение позволяет пользователю выбрать среду (вода, открытый воздух или помещение), параметры среды (температура, влажность, скорость движения воздуха и т.д.), вид физической активности, мощность нагрузки, одежду или защитное снаряжение. Так, для прогноза состояния человека во время марафона, выбран вид физической активности — бег (running), дистанция 42,2 км и длительность пробега 2,1 часа (Рис. 4а). Условия окружающей среды, полученные с сервиса погоды в этот момент с учетом геолокации клиента: температура 24 °С, относительная влажность 50% и скорость движения воздуха 4 м/с.

В окне *результатов прогнозирования* (Рис. 4б) показано предупреждение (Caution): потеря жидкости в организме спортсмена за дистанцию превысила норму, что является фактором риска его здоровья. Выдана рекомендация (Recommendation): необходимо восполнить потерю жидкости (выпить воды). Внутренняя температура тела (Core temperature) и потери жидкости (Water loss) изображены в виде маркера на шкале. Для наглядности зоны безопасности и зоны риска обозначены разными цветами. На температурной шкале



**Рис. 4.** Интерфейс приложения: а) окно ввода исходных данных; б) окно результатов прогнозирования

зеленый цвет означает безопасный для здоровья человека диапазон, синий — угроза гипотермии (переохлаждения), красный — угроза гипертермии (перегрева). На шкале потери воды зеленым цветом обозначены допустимые значения — до 2% от массы тела, желтым — умеренная дегидратация (2% ÷ 4%), красный — угроза сильной дегидратации (> 4%) [10].

На экране показаны температура крови (Tblood) спортсмена к концу марафонской дистанции, средняя температура кожи (Tskin), образующееся во время бега тепло (Heat production) и потери тепла при испарении пота с поверхности тела (Sweat evaporation). По желанию пользователь может рассмотреть результаты прогнозирования детальнее (Find out more).

**Выводы**

Предложенная информационная смартфон система предоставляет новые возможности для поддержания здорового образа жизни, так как позволяет выявить и предупредить факторы стресса здоровья человека. Клиент-серверная архитектура приложения обеспечивает многопользовательский доступ к ресурсам и возможностям смартфон системы. Клиентская часть реализована в виде приложения для смартфона, которое позволяет выполнять ввод, первичный контроль и передачу данных на сервер, а затем осуществлять прием и отображение результатов на экране. Серверная часть системы состоит из программы управления потоками данных, сервисной платформы, базы персональных данных и базы данных результатов прогнозирования.

Мультифункциональная сервисная платформа содержит комплекс программных модулей для решения задач пребывания человека в жарких и холодных условиях среды, при повышенной влажности, при пребывании в холодной воде, во время выполнения интенсивных физических нагрузок и многих других. Именно сервисная платформа, составляющая основу смартфон технологии, позволяет получить прогноз функционального состояния человека, что может помочь пользователю принять правильное решение о длительности его пребывания в различных условиях среды.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. How Smartphone Technology Is Changing Healthcare In Developing Countries The *Journal of Global Health*. URL: <https://www.ghjournal.org/how-smartphone-technology-is-changing-healthcare-in-developing-countries/How-Smartphone-Technology-Is-Changing-Healthcare-In-Developing-Countries> (дата обращения: 29.08.2018).
2. Garge G. K., Balakrishna C., Datta S. K. Consumer health care: Current trends in consumer health monitoring. *IEEE Consumer Electronics Magazine*. 2018. Vol. 7, №1. P. 38–46.
3. Dorosh N.V., Boyko O.V., Ilkanych K.I., Zayachkivska O.S., Basalkevych O.Y., Yermakova I.I., Dorosh O.I. M-health technology for personalized medicine. Development and modernization of medical science and practice: experience of Poland and prospects of Ukraine: Collective monograph. Vol.1. Lublin: Izdevnieciba "Baltija Publishing", 2017. P. 66–85.
4. Гриценко В.И., Ермакова И.И., Богатынкова А.И., Дорош О.И. IT-инфраструктура для персонализированного мобильного здоровья. *Вісник НАН України*. 2016. № 2. С. 87–90.
5. Dorosh N., Ilkanych K., Kuchmiy H., Boyko I., Yermakova I., Dorosh O., Voloshyn D. Measurement modules of digital biometric medical systems based on sensory electronics and mobile-health applications. *Proceedings of the 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. IEEE (Slavske, 20 – 24<sup>th</sup> of Feb. 2018). Slavske, 2018. P. 687–691.
6. Masciantonio M. G., Surmanski A. A. Medical smartphone applications. *University of Western Ontario Medical Journal*. 2017. Vol. 86(2). P. 51–53.
7. Ермакова И.И. Информационная платформа мультикомпаратментальных моделей терморегуляции человека. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2013. Вып. 174. С. 81–91.
8. Гриценко В.И., Ермакова И.И., Духновская К.К., Тадеева Ю.П. Динамические модели и информационные технологии для прогноза жизнедеятельности человека. *Управляющие Системы и Машины*. 2004. Вып 2. С. 56–60.
9. Kumar S., Nandury S. V., Raj S. An Extended Client Server Architecture in Mobile Environment. *International Journal of Computer Engineering and Applications*. 2014. Vol. 5(2). P. 97–107.
10. Armstrong L.E., Ganio M.S., Casa D.J., Lee E.C., McDermott B.P., Klau J.F., Jimenez L., Le Bellego L., Chevillotte E., Lieberman H.R. Mild Dehydration Affects Mood in Healthy Young Women. *The Journal of nutrition*. 2011. Vol. 142(2). P. 382–388.

Получено 30.08.2018

## REFERENCES

1. How Smartphone Technology Is Changing Healthcare In Developing Countries The *Journal of Global Health*. URL: <https://www.ghjournal.org/how-smartphone-technology-is-changing-healthcare-in-developing-countries/How-Smartphone-Technology-Is-Changing-Healthcare-In-Developing-Countries> (Last accessed: 29.08.2018).
2. Garge G. K., Balakrishna C., Datta S. K. Consumer health care: Current trends in consumer health monitoring. *IEEE Consumer Electronics Magazine*. 2018. Vol. 7, №1. P. 38–46.
3. Dorosh N.V., Boyko O.V., Ilkanych K.I., Zayachkivska O.S., Basalkevych O.Y., Yermakova I.I., Dorosh O.I. M-health technology for personalized medicine. Development and modernization of medical science and practice: experience of Poland and prospects of Ukraine: Collective monograph. Vol. 1. Lublin: Izdevnieciba “Baltija Publishing”, 2017. P. 66–85.
4. Gritsenko V.I., Yermakova I.I., Bogationkova A.I., Dorosh O.I. Information Technologies For Personalized m-Health. *Visnyk of the National Academy of Sciences of Ukraine*. 2016. № 2. P. 87–90. (in Ukrainian)
5. Dorosh N., Ilkanych K., Kuchmiy H., Boyko I., Yermakova I., Dorosh O., Voloshyn D. Measurement modules of digital biometrie medical systems based on sensory electronics and mobile-health applications. *Proceedings of the 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. IEEE (Slavske, 20–24<sup>th</sup> of Feb. 2018). Slavske, 2018. P. 687–691.
6. Masciantonio M. G., Surmanski A. A. Medical smartphone applications. *University of Western Ontario Medical Journal*. 2017. Vol. 86(2). P. 51–53.
7. Yermakova I. Information platform of multicompartmental models of human thermoregulatory system. *Kibernetika i vychislitel'naâ tehnika*. 2013. Vol. 174. P. 81–91. (in Russian)
8. Gritsenko V., Yermakova I., Dukhnovskaya K., Tadejeva J. Dynamic models and information technologies for prediction of human vital functions. *Control Systems and Computers*, 2004, vol. 2, P. 56–60. (in Russian)
9. Kumar S., Nandury S. V., Raj S. An Extended Client Server Architecture in Mobile Environment. *International Journal of Computer Engineering and Applications*. 2014. Vol. 5(2). P. 97–107.
10. Armstrong L.E., Ganio M.S., Casa D.J., Lee E.C., McDermott B.P., Klau J.F., Jimenez L., Le Bellego L., Chevillotte E., Lieberman H. R. Mild Dehydration Affects Mood in Healthy Young Women. *The Journal of nutrition*. 2011. Vol. 142(2). P. 382–388.

Resieved 30.08.2018

*Yermakova I.I.*, DSc (Biology), Professor,  
Leading Researcher, Dept. of Complex Research of Information Technologies  
e-mail: : irena.yermakova@gmail.com  
*Nikolaenko A.Yu.*, Researcher,  
Dept. of Complex Research of Information Technologies  
e-mail: n\_nastja@ukr.net  
*Solopchuk Yu.M.*, Researcher,  
Dept. of Complex Research of Information Technologies  
*Hrytsaiuk O.V.*, 1<sup>st</sup> category software engineer,  
Dept. of Complex Research of Information Technologies  
*Tadeieva Yu.P.*, Ph.D. (Engineering), Senior Researcher,  
Dept. of Complex Research of Information Technologies  
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. Glushkov av., 40, Kiev, 03187, Ukraine

## INFORMATION SMARTPHONE TECHNOLOGY FOR PREDICTION OF HUMAN HEALTH STATE UNDER EXTREME ENVIRONMENTAL CONDITIONS

**Introduction.** Nowadays it can't be imagined the development of personalized e-medicine without smartphone use. It involves the integration of information platforms, mobile applications and portable medical devices via cloud technologies into a single system. Predictive systems that can assess and prevent risk factors of human health in extreme environmental conditions is still absent in contemporary mobile personalized medicine. Combining the unique features of the service platform with the recent development of m-health allows to develop a unique information smartphone system for assessing the risk factors of human health in various environmental conditions. The system allows to collect personal data, integrate them with another mobile apps and gadgets data and thus provide predictions of the human state.

**The purpose of the article** is to develop an intelligent information system using smartphone technologies based on a multi-functional service platform for predicting a human functional state under extreme environmental conditions.

**Results.** A client-server architecture was used to build the intelligent information smartphone system, which allows a user to access the service platform (the crucial feature of the system) and a centralized database via the smartphone application.

The "client" is the smartphone application that uses network protocols to exchange data with the server. Data input, primary control and data transfer to the server, as well as receiving and displaying the prediction results on the smartphone screen are the main functions of the app. The server software provides data management (receiving, processing, transferring and storing data in the databases), automatically controls the integrity and consistency of the information received and stored, manages multi-user access and confidentiality of databases of different users, logs system events, etc.

The unique distinctive feature of the developed system is the service platform for processing the entered conditions data and giving the prediction of human functional state. The prediction results are analyzed and based on the results of the analysis the system identifies probable health risk factors. The automatic analysis and decision making allow to classify the developed system as an intelligent information technology.

**Conclusions.** The smartphone-health system has been developed. The system has a client-server architecture that provides multi-user access to its resources and features.

The "client" is a smartphone application that allows a user to input, control and transfer the data to the server, and then receive and display the results on the screen. The server consists of a data flow manager, the service platform, prediction result database. The multifunctional service platform provides functional state prediction under chosen environmental conditions and the physical activity.

**Keywords:** *smartphone, e-health, human state prediction, mobile health, extreme environmental conditions.*

Ермакова І.І., д-р біол. наук, професор,  
пров. наук. співроб. відд. комплексних досліджень інформаційних технологій,  
керівник тематичної групи «Мобільне здоров'я. Методи та засоби».  
e-mail: irena.yermakova@gmail.com  
Николаєнко А.Ю., наук. співроб.,  
відд. комплексних досліджень інформаційних технологій.  
e-mail: n\_nastja@ukr.net  
Солопчук Ю.М., наук. співроб.,  
відд. комплексних досліджень інформаційних технологій.  
Грицаюк О.В., інженер-програміст 1-ої категорії,  
відд. комплексних досліджень інформаційних технологій.  
Тадеєва Ю.П., канд. техн. наук, старший науковий співробітник,  
відд. комплексних досліджень інформаційних технологій.  
Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій  
та систем НАН України та МОН України,  
пр. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187

#### ІНФОРМАЦІЙНА СМАРТФОН ТЕХНОЛОГІЯ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВАХ СЕРЕДОВИЩА

Запропоновано новий підхід і метод створення смартфон технології в персоніфікованій медицині, основою якої є комплекс математичних моделей функціонального стану людини в різних умовах. Розглянуто інтелектуальну інформаційну технологію для смартфона, яка дає змогу отримати прогноз стану здоров'я людини в екстремальних умовах середовища. Надано архітектуру клієнт-серверного застосунку, що забезпечує багатокористувацький доступ до ресурсів та можливостей смартфон технології. Технологія дає можливість оцінити і попередити фактори ризику здоров'я людини за умов спеки та холоду, підвищеної вологості, перебування в холодній воді, під час виконання інтенсивних фізичних навантажень тощо.

**Ключові слова:** *смартфон, цифрова медицина, прогнозування стану здоров'я, мобільне здоров'я, екстремальні умови.*



DOI: [https:// 10.15407/kvt194.04.041](https://10.15407/kvt194.04.041)

UDC 004.942: 681.513.8

**STEPASHKO V.S.**, DSc (Engineering), Professor,  
Head of Dept. for Information Technologies of Inductive Modeling  
e-mail: [stepashko@irtc.org.ua](mailto:stepashko@irtc.org.ua)  
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. Glushkov av., 40, Kyiv, 03187, Ukraine

## FORMATION AND DEVELOPMENT OF SELF-ORGANIZING INTELLIGENT TECHNOLOGIES OF INDUCTIVE MODELING

---

**Introduction.** *Effective solution of control and decision-making tasks in complex systems should use the results of mathematical modeling. To construct adequate predictive models, many modern methods and tools are available which may be generally based on two principal approaches: theory-driven (deductive) and data-driven (inductive) ones. The data-driven methods are basic for solving typical tasks of data mining; they implement an inductive process of transition from particular data to models generalizing the data. Among all such methods, very notable are those being developed within the area of GMDH-based inductive modeling founded several decades ago by academician O.H. Ivakhnenko.*

**The purpose of this paper** is analysing the background of the GMDH invention by Ivakhnenko and the evolution of model self-organization ideas, methods and tools during the half-century historical period of successful development of the inductive modeling methodology.

**Results.** Professor Ivakhnenko acquired broad knowledge in the areas of automatic control, engineering cybernetics and emerging neuroscience initiated by the idea of perceptron. These were those prerequisites which helped Ivakhnenko to synthesize his original self-organizing approach to solving tasks of constructing models of objects and processes on the basis of experimental data. The paper tracks evolution of scientific ideas and views of Ivakhnenko and main achievements in development of GMDH during the period 1968-1997. Contributions of researchers from different countries to the GMDH modification and application are characterized. Results of further developments of inductive modeling methods and tools in the ITIM department are presented and the most promising prospects of investigations in this field are indicated.

**Conclusions.** *Main prerequisites facilitating the creation of the GMDH by O.H. Ivakhnenko were analysed, basic fundamental, technological and applied achievements of the half-century development of inductive modeling both in Ukraine and abroad were characterized, as well as the most prospective ways of further research were formulated.*

**Keywords:** *mathematical modeling, data-driven modeling, model self-organization, GMDH, inductive modeling, noise-immune modeling, information technology, case study.*

## INTRODUCTION

Effective solution of control and decision-making tasks in complex systems should use the results of mathematical modeling. To construct adequate predictive models, many modern methods and tools may be used which generally can be based on two principal approaches: theory-driven or deductive and data-driven or inductive ones. The data-driven methods are basic for solving tasks of data mining; they implement an inductive process of transition from particular data to models generalizing the data.

Among all data-driven methods, very notable are those being developed in the area of inductive modeling based on the Group Method of Data Handling (GMDH) [1-4]. For the scientific school of inductive modeling, founded several decades ago by Professor Oleksiy Hryhorovych Ivakhnenko, the year 2018 is reach for a few remarkable jubilees:

- **105** years of Ivakhnenko's birthday (1913),
- **80** years of his first published article (1938),
- **75** years ago he defended the thesis for the title Candidate of Engineering Science (1943),
- **50** years of his the very first article on the worldwide-known GMDH (1968),
- **15** years ago he was elected Academician of NAS of Ukraine (2003),
- **20** years ago, the Department for Information Technologies of Inductive Modeling (ITIM) was established at the IRTC ITS of the NAS and MES of Ukraine.

Taking into account the central item in this list, namely the **half-century jubilee** of the GMDH origination, which is the main methodological base of Inductive Modeling, it is reasonable to look through the historical period of formation and development of this scientific direction. Accordingly, this article is intended to analyze the following aspects:

- attempt to understand which sum of acquired knowledge helps Ivakhnenko to approach in 1968 to the creation of GMDH as a self-organizing method of modeling from experimental data;
- examination of main achievements in development of this induction-based method during long period from 1968 to 1997;
- appraisal the contribution of researchers from different countries into evolution of the method;
- explanation of main developments of the ITIM Department in further progress of the theory, tools and applications of the GMDH-based inductive modeling during last 20 years, presenting the modern stage of functioning the inductive modeling school;
- foresight of forthcoming prospects in development of the subject-area of inductive modeling.

These aspects are comprehensively reflected below in the article and they differ its matter from the known surveys [1-4] dealing with analysis of various periods of GMDH and inductive modeling development.

## EVOLUTION OF SCIENTIFIC IDEAS AND VIEWS OF O.H. IVAKHNENKO PRIOR TO THE “GMDH ERA”

**Scientific and administrative career.** After defending in 1954 the thesis for the degree Doctor of Engineering Sciences in Kiev Polytechnic Institute and receiving in 1956 the academic title Professor, O.H. Ivakhnenko has become Head of laboratory "Automatic control of manufacturing processes" at the Institute of Electrical Engineering of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR (1956–1962) reorganized later into the Department of Engineering Cybernetics at the same institute (1962–1963). In 1961, Ivakhnenko was elected the Corresponding member of the AS of UkrSSR.

In 1963, he with all members of his team has moved to the Institute of Cybernetics of the Academy of Sciences being invited by the Academician V.M. Glushkov, and worked there long time as Head of the Department of Combined Control Systems (1963–1989). After retirement of Ivakhnenko in 1989 from the leading position, the Department was reorganized into the Laboratory of modeling after experimental data headed by his disciple PhD G.I. Krotov. In 1995, all the laboratories in the NASU were closed up, and this team worked in another department as autonomous scientific group.

Based on this group, the Department for Information Technologies of Inductive Modeling (ITIM) was established in 1998 at the IRTC ITS of the NAS and MES of Ukraine headed by his disciple and follower DSc. V.S. Stepashko, and Professor Ivakhnenko worked there as a Directorate Adviser. In 2003, in the year of his 90th anniversary, O.H. Ivakhnenko was elected Academician of the NAS of Ukraine for outstanding achievements in the development of computer science and artificial intelligence in Ukraine. He fruitfully worked at the department up to 2007 when he passed away.

**Main stages of the scientific activity.** Oleksiy Hryhorovych was an outstanding scientist in the fields of automatic control, cybernetics and informatics whose research results in various areas had received worldwide recognition. The fact is that Ivakhnenko always proves the validity of his views both theoretically and also by the actual results, namely devices, operating systems and specific applied tasks solved and it was impossible to not acknowledge such evidences of rightness of his viewpoint.

**Electroautomatics.** Prior to the period of the 1960s, the main achievements of O.H. Ivakhnenko concern areas of electroautomatics and the invariance theory: he has developed a new principle of automatic speed control of alternating current motors using magnetic amplifiers, asynchronous motors by the difference of voltage and current etc. [5].

**Combined systems of automatic control.** O.H. Ivakhnenko developed the theoretical basis of invariant automatic control systems that operate by the principle of compensation of the measured disturbances. He is the author of a new for automatic control theory *principle of combined control* based on the negative feedback with respect to the controlled variable and the positive (compounding) feedforward by controlled disturbances. This principle allowed for the first time to create real invariant systems of automatic control for asynchronous motors speed [6].

**Control systems with self-tuning, self-learning, pattern recognition and forecasting.** O.H. Ivakhnenko proposed to use a variety of devices and methods of self-tuning in combined control systems. He published in 1959 the very first

in the former USSR monograph on engineering cybernetics [7] where the *cybernetic control systems* are considered which differ from the *conventional automation systems* by the presence of automatic self-modification, self-adaptation and self-tuning of characteristics when external and internal influences change. This book brought him international recognition and was reprinted in English and some other European and Asian languages. He was invited to give lectures in Europe and the USA; the "father of cybernetics" Norbert Wiener visited Kyiv in 1962 at his invitation.

In 1960th, working at the Institute of Cybernetics, O.H. Ivakhnenko started to use principles of self-learning, pattern recognition and forecasting when designing control devices. Under his leadership, the recognition system "Alpha" was constructed which demonstrated the self-learning process at first time in the world. His monograph "Cybernetic forecasting devices" [8] was re-released in English, Polish, German and Chinese.

The sum of this broad and diverse knowledge acquired by him personally and supplemented by deep understanding the possibilities of the perceptron introduced by Frank Rosenblatt [9] were those prerequisites which help Ivakhnenko to synthesize his original self-organizing approach to solving tasks of constructing models of objects and processes on the basis of experimental data. This development gave start to new, long and very fruitful period of his scientific creativity.

## MAIN ACHIEVEMENTS IN DEVELOPMENT OF GMDH DURING THE PERIOD 1968-1997

**Heuristic self-organization of models.** The very first article [10] on the group method of data handling (GMDH) published in 1968 in Ukrainian journal "Автоматика", reprinted in the USA [11] and followed by publications [12, 13] abroad, signified the beginning of the most fruitful stage in the creative scientific work of O.H. Ivakhnenko. It is worth to note that in Ukrainian language this method is called «Метод групового урахування аргументів» (МГУА), and direct translation would give an accordant and correct English equivalent "Method of Group Using of Arguments" (MGUA). But when translating the article [10] in the USA journal "Soviet automatic control", the reprinted version of "Автоматика", a specific name "Group Method of Data Handling" was introduced and the abbreviation GMDH is now world-wide known as the method, explicitly associated with its creator.

With these publications, a new scientific area has emerged that was named at first by Ivakhnenko as "heuristic self-organization of models" [14]. This name had several modifications later: "self-organization of models from experimental data", further "inductive self-organization of models" [15], then "inductive learning algorithms" [16], and finally, from the 1998, simply "inductive modeling" (see below). Active development of this area was determined by brilliant scientific intuition of the author and his original scientific hypotheses. Since 1968, this new scientific field is steadily and successfully developing being recognized, adopted and used by researchers around the world.

Generally speaking, the task of inductive modeling consists in an automated data-based construction of a mathematical model, approaching an unknown regularity of functioning the simulated object or process. GMDH is an original self-organizing inductive method of modeling from experimental data, or structure and parametric identification of forecasting models, first of all of polynomial type, under

uncertainty conditions. It is notable for application of the following main principles for solving optimization tasks of parameter estimation and structure determination:

- automatic generation of groups of model variants with various complexity;
- inductive way of model construction with evolution from simple to more complex model structures;
- evaluation of the model quality by external criteria based on the division of a dataset into at least two parts: the first one is used for parameter estimation and the second for criteria calculation;
- non-final decisions during the evolutionary modeling process: at any stage or iteration, not unique the best model is selected but a subset of best ones;
- successive selection of models of optimum complexity with respect to minimal values of the external criteria.

GMDH is intended for automatic building a mathematical model that reproduces the unknown regularity of operation of the investigated object information on which is implicitly contained in the available data sample (table). After the modern terminology this is an original means of data mining.

The method effectiveness was repeatedly confirmed by the solution of various of practical problems of modeling complex objects and processes in areas of ecology, economy, engineering, technology, hydrometeorology, etc. [14–16]. In parallel, researches were conducted on the development and application of self-organization algorithms in pattern recognition tasks [17].

**General characteristic of the model self-organizing task.** As a rule, GMDH deals with building models in the class of functions linear in parameters. Let us be given a data sample  $W = [Xy]$  of  $n$  observations over  $m$  input variables  $X = [x_{ij}]$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, m}$ , and one output  $y = (y_1, \dots, y_n)^T$ . Suppose that we may build a set  $\Phi$  of various models of the form

$$\hat{y}_f = f(X, \hat{\theta}_f), \quad f \in \Phi, \quad (1)$$

using the data set  $W$ , where the parameter estimation  $\hat{\theta}_f$  for each  $f \in \Phi$  is the solution of a task of continuous minimization of an error criterion  $QR(\cdot)$ :

$$\hat{\theta}_f = \arg \min_{\theta_f \in R^{s_f}} QR(X, y, \theta_f) \quad (2)$$

where  $s_f$  is the complexity of the model (1), or the number of unknown parameters of the model.

Consequently, the problem of the best model constructing from the given experimental data consists then generally in finding the minimum of a given criterion  $CR(\cdot)$  on the discrete set  $\Phi$  of models of different structures:

$$f^* = \arg \min_{f \in \Phi} CR(X, y, f) \quad (3)$$

The two criteria  $QR(\cdot)$  and  $CR(\cdot)$  are called in the GMDH theory as *internal* and *external* ones respectively. They should be different,  $QR(\cdot) \neq CR(\cdot)$ , because

in another case the task (3) has trivial solution:  $f^*$  corresponds to the model of maximum complexity  $s_{\max}$ . It is evident especially in the case of linear functions, when the task (2) is solved using the Least squares method (LSM) for estimation of parameters, and the LSM is a monotonically decreasing function of the number of parameters.

To ensure the condition  $QR(\cdot) \neq CR(\cdot)$ , in GMDH the data division into at least two parts is used:

$$W = \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_A y_A \\ X_B y_B \end{bmatrix}, \quad (4)$$

then the internal criterion has the form  $QR(X_A, y_A, \theta_f)$  when the external one  $CR(X_B, y_B, \hat{\theta}_{Af})$ : they are evidently different, and the task (3) is not trivial.

In general, the process of solving the problems of structural and parametric identification (1–3) includes the following main stages:

- 1) setting a data sample and a priori information;
- 2) the choice or assignment of a class of basic functions and the respective transformation of data;
- 3) generation of different model structures in this class;
- 4) estimation of parameters of generated structures by an internal criterion  $QR(\theta_f)$  and formation of the set  $\Phi$ ;
- 5) minimization of a given external criterion  $CR(f)$  and selection of the optimal model  $f^*$ ;
- 6) checking the adequacy of the model obtained;
- 7) completion of the process and/or the use of the model.

This means that each modeling method including GMDH can be described with the help of four main components: a) class of basic functions, b) structure generator, c) method for estimating parameters, and d) criterion for model selection. As far as GMDH is dealing mainly with model classes linear in parameters, the use of LSM-estimator is the best option. Hence, there is a need to analyze the formulas for external criteria and the types of model structure generators in GMDH algorithms.

One can use two main external criteria for model selection based on the sample division (4). The first one is called the *regularity* criterion which for linear models equals to the model error on the data subset  $B$  when parameters were estimated on the subset  $A$ :

$$AR_B(X_B, y_B, \hat{\theta}_A) = \|y_B - X_B \hat{\theta}_A\|^2. \quad (5)$$

And another one is the unbiasedness criterion, evaluating the difference between outputs of two models of the same structure with parameters estimated on the parts  $A$  and  $B$ :

$$CB = \|X_W \hat{\theta}_A - X_W \hat{\theta}_B\|^2. \quad (6)$$

**Main types of GMDH algorithms.** Any of the GMDH algorithms realizes some kind of a self-organizing process of sequential generation of more and

more complex models in an inductive manner: any next such complication takes into account results of the previous stage of model building and may be based on both adding some new members to the previous model structures and combining them using some superposition function called “*partial description*”. This self-organizing process of model complication stops when the minimum value of a given external criterion is reached.

Consequently, all the GMDH algorithms are generally divided into two big separate groups: the *sorting-out* [18] and *iterational* [19] ones that differ from each other by the methods of model structures generation and the procedures of search of minimum of a selection criterion based on a data sample division into two or more parts.

*Sorting-out GMDH algorithms.* The first type algorithms generate models of various structures in a given set of basic functions like members of polynomial of a preset power or lag terms of an autoregression model. They all are based on the *exhaustive* or *directed* search of the model of optimal complexity.

The most known *combinatorial algorithm* is called COMBI [20] generating all possible model structures:

$$y_v = X_v \hat{\theta}_v, v = 1, \dots, 2^m, \quad (7)$$

where the decimal number  $v$  is assigned a binary structure vector  $d_v$ , in which units indicate the presence of arguments, when zeros their absence. Here, the number of models being compared and forming the set  $\Phi$  equals to  $2^m$  and the exhaustive search is effective only up to approximately  $m = 30$  because of exponential growth of calculations.

The purpose of the *directed search* methods is to find the global minimum of the selection criterion, i.e. the result of an exhaustive search, by significantly smaller calculations. They are runnable with hundreds of arguments, e.g. the multistage algorithm MULTI [21] which uses a special step-by-step evolving procedure of the type

$$\hat{y}_s^l = (X_{s-1}^i | x_s^j) \hat{\theta}_s, s = \overline{1, m}, i, l = \overline{1, F_{s-1}}, \quad (8)$$

where  $s$  is the stage number (and the structure complexity);  $F_s$  — number of the best structures (freedom of choice) at the stage  $s$ ;  $j$  is the index of an argument vector being added to the matrix  $X_{s-1}^i$ . In this case, a subset  $\Phi_s \subseteq \Phi$  is analyzed, with a high probability containing the result of a complete search. This algorithm has the polynomial complexity of order  $m^3$ .

*Iterative GMDH algorithms.* The second type algorithms, being classical, are based on the nature inspired idea of biological selection with pairwise account of features. According to the principle of operation, the iterative GMDH algorithms are similar to methods of optimization using successive approaching, but the principle of indecisive solutions (freedom of choice  $F$ ) is here substantially used. Depending on the method of successive approaching, they may be divided into two main groups: *multilayered* and *relaxational* ones.

The conventional is the so-called multilayered algorithm [11–13] which starting from late 1990<sup>th</sup> is commonly called in the current literature as *multilayered iterative algorithm* MIA GMDH. It is the algorithm that was initially created in 1968 by Ivakhnenko and named *multilayered algorithm* MGUA/GMDH.

It has the perceptron-like architecture and constructs hierarchical network-type models through an iterative procedure of step-by-step complicating model structures: a partial model of a current layer/iteration is a polynomial of any pair of models of the previous layer.

The MIA GMDH was constructed by the analogy with the biological selection of living organisms: the complication of models from  $r$ -th layer to  $(r+1)$ -th occurs due to the "crossing" of all possible pairs from  $F$  best models of the previous layer. Typically, the MIA partial description is of the form:

$$y_l^{r+1} = f_l(y_i^r, y_j^r), r = 0, 1, \dots; i, j = \overline{1, F}; l = \overline{1, C_F^2}, \quad (9)$$

where second order polynomial is usually used, but bilinear or even linear one may be applied as well. The iterative process of model complication stops after the criterion  $CR$  starts to increase.

During 1970<sup>th</sup>, there were developed a lot of various modifications of the classical algorithm; the most original among them are: multilayered algorithm with orthogonalization of arguments [22], linear CML [23] and nonlinear GN [24] algorithms. They were generally dissimilar but had common features separating them from the classical type algorithm: they have the only two-member partial descriptions and the use of initial arguments on each layer of selection. A GMDH procedure of such type (based on adding initial arguments to the intermediate ones) is called now *relaxational iterative algorithm* RIA GMDH.

In GMDH algorithms of the RIA type, models are complicated on each layer by "crossing" the best models of the previous layer with the initial arguments, and a partial description of the following modification:

$$y_l^{r+1} = f_l(y_i^r, x_k), i = \overline{1, F}; k = \overline{1, m}, \quad (10)$$

which may be used with quadratic, bilinear or linear polynomial.

Such kind of descriptions was introduced in [22–24] in the form  $y_l^{r+1} = y_i^r + \varphi(x_k)$ ,  $i = \overline{1, F}; k = \overline{1, m}$  to avoid some known drawbacks of the MIA GMDH: e.g., they help to exclude the possibility of losing relevant arguments.

In general, iterative GMDH algorithms are operable at  $m > 1000$ , and they allow constructing models even in degenerate problems when  $n < m$ . Historically the very name of GMDH is associated primarily with them.

Expressions (7–10) represent in a simplified form the four main types of structure generators in GMDH algorithms. All of them build models that are linear in parameters but generally non-linear in inputs. Typical GMDH applications are modeling of nonlinear systems, forecasting complex processes, function approximation, recognition, classification, clustering and others.

**Control with optimization of forecast.** In 1970<sup>th</sup>, O.H. Ivakhnenko had developed a new method of control with the forecast optimization [25] (optimization on a sliding finite interval) which was fundamentally necessary in control problems of environmental systems as the tasks with predicted disturbances. A control system with such an optimizer is a combined one: in the implemented control action the requirements are taken into account of both stabilization of the output value and advanced compensation of the measured disturbance that attaches intelligent features to the control system. Such an approach called currently "predictive control" had started to develop only in the late 1980<sup>th</sup>.



**Noise-immune modeling.** In early 1980<sup>th</sup> O.H. Ivakhnenko had established an organic analogy between the tasks of model construction from noisy data and signal passing through a noisy channel [26]. This had made it possible, using Kotelnikov's ideas on the noise-immune receiver of signals, to suggest the so called "ideal criterion" for modeling tasks that enabled to proof theoretically better forecasting capabilities of "non-physical" models [27] and to build fundamentals of the noise-immune modeling theory [18]. The basic result of the theory: the complexity of optimum model depends on the level of uncertainty — the higher it is the simpler (more «robust») is to be the optimum model.

**Two-level predictive models.** For modeling of dynamics of cyclic processes, in particular economic and ecological, O.H. Ivakhnenko suggested a method for construction of multilevel forecast systems [25]. The theoretical base of the two-level modeling was presented in [18], and an appropriate algorithm for construction of two-level difference models for cyclicities of the "cycle-time" type was described in [28]: the variables of upper (cycle-averaged) and lower (time-averaged) levels in their balance relationship are thus considered.

**Non-parametric forecasting.** O.H. Ivakhnenko developed original non-parametric approaches to forecasting complex processes: correlation predictive models; a reverse transformation of the transition probabilities matrix into forecast [29]; a method of the group *analogues complexing* [30].

**Ideas of systems analysis and clustering.** An algorithm of *objective system analysis* (OSA) is intended for determination of inputs and outputs variables among all measured ones and building the system of difference equations of an object dynamics [31]. An algorithm of the *objective computer clusterization* (OCC) solves the tasks of clustering with the use of self-organization of the quantity and composition of clusters [32].

**Modeling with other basic functions.** O.H. Ivakhnenko promoted evolving new algorithms of model construction in such model classes: *harmonic models* of oscillatory processes in the form of sum of harmonics with aliquant frequencies [33]; nonlinear *additive-multiplicative models* with automatic determination of non-integer degrees of input variables [34]; etc.

**Analysis of selection criteria, optimal complexity of models.** In the GMDH theory, the scope is first of all on analysis of selective properties of external criteria which is carried out within the framework of the noise-immune modeling theory. The initial results [26, 27, 18] were supplemented in [35, 36] by studies of so-called J-optimality (J-criterion is another name for the "ideal" one [27]).

Theoretical results regarding the problem of convergence analysis of iterative GMDH algorithms one can find in [37, 23, 19]. Another important aspect of the GMDH theory was concerned the analysis of asymptotic properties of external criteria [38, 39]. Main results of O.H. Ivakhnenko and his colleagues during 1980<sup>th</sup> are reflected both in the domestic books [18, 19] and abroad [16].

**GMDH as the polynomial neural network.** In 1990<sup>th</sup>, the typical MIA GMDH procedure was interpreted as an original architecture of a neural net called *polynomial neural network* (PNN). The point is that the originality of GMDH as a neuronet consists in self-organization of both its structure and parameters. To the explicit advantages of GMDH we can refer automatic formation of a network structure, simplicity and speed of parameters adjustment as well as the possibility to "fold" the adjusted network directly into an explicit

mathematical expression ready to be used for solving tasks of simulation, prediction, control and decision making.

To illustrate the originality of the MIA GMDH as an automatically constructed PNN architecture, Fig. 1 represents a very simple example of the network state (for the case of 4 input arguments): a) after stopping the forward iterative process of the best model  $f^*$  building, and b) the resulting trained GMDH network after backward tuning. As the result of the net self-organization, the argument  $x_2$  appears to be redundant. As it is evident, the tuned net may be easily reduced to direct formula  $f^* = f(x_1, x_3, x_4)$ .

**Neuronet with active neurons.** A typical "GMDH neuron" in the form of quadratic polynomial of two arguments can be called as "passive" because any of the neurons have the same fixed structure, i.e. the PNN GMDH is *homogeneous* net. In the 1990<sup>th</sup>, Ivakhnenko proposed a new type of GMDH network with *active neurons* [40] or a *heterogeneous* network in which any of the neurons is in turn also a GMDH algorithm, due to that the structure of such neuron is optimized. As a result, all neurons can get different structures increasing the flexibility of configuring the network to a specific task. Networks of such type are also called as "twice multilayered" ones [41].

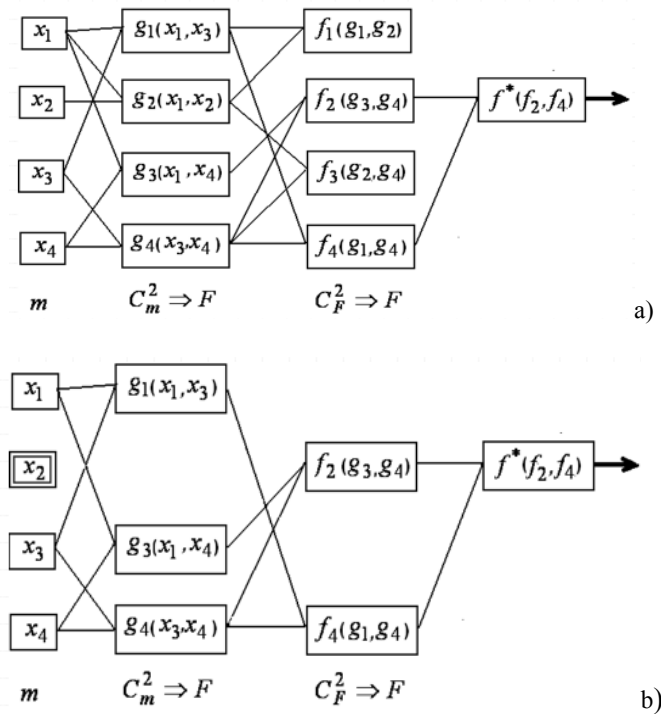


Fig. 1. An example of self-organization of the GMDH net architecture

## DEVELOPMENT OF IVAKHNENKO'S IDEAS BY RESEARCHERS OF THE WORLD

Scientific results of O.H. Ivakhnenko are widely known in Ukraine and abroad: more than 40 books and 500 scientific papers were published by him, many of which, in the first place books, was republished in English, German, Polish, Bulgarian, Romanian and Chinese (11 monographs published abroad). Graphic evidence of the global recognition of merits of this method and its author was the publication in 1984 in the United States of the monograph of American and Japanese researchers on theoretical and applied aspects of GMDH [42] dedicated to the 70th anniversary of the GMDH author.

*Hybrid GMDH-type algorithms and neural networks.* New and efficient architectures of neuronets are recently intensively developed on the basis of hybridization of GMDH procedures and various approaches of computational intelligence and nature-inspired solutions: particle swarm optimization [43], RBF [44], genetic selection and cloning [45], immune systems [46] etc. Several variants of hybridization are implemented in the GMDH-based architecture called GAME [47].

*Fuzzy and interval approaches in inductive modeling.* For the real tasks with fuzzy variables there have developed corresponding algorithms: Multi-layer hybrid fuzzy PNN [48]; Fuzzy GMDH [49] based on the classical structure MIA GMDH; GMDH-like cascade wavelet-neuro-fuzzy network [50]. For another case of initial assumption on interval-given input data, a method [51] has elaborated.

*Algorithms based on paralleling operations.* There are several effective realizations of both iterative [52] and combinatorial [53] algorithms with implemented parallel computations.

*Ensembling-based prediction.* The core idea in the GAME method [54] is a kind of non-parametric procedures for predicting processes using not a separate model but a weighted average of assemblage of several predictions obtained by various GMDH-type algorithms.

*Automated data preprocessing.* An advanced idea is suggested in [55] to build some kind of automated means for data preprocessing enabling to enhance the accuracy of classification.

*Modeling tasks with multiple outputs.* New analytical and applied results were obtained for the task of inductive modeling of multidimensional systems with many outputs [56].

*Inductive algorithms for classification, recognition, clusterization.* Essential part of real-world problems requires application of special methods of pattern recognition in wide sense. Among current developments in the inductive modeling field there are many methods and tools dealing with tasks of such type, for instance [47, 57].

*Software tools based on GMDH.* There are several examples of computer tools for modeling complex systems completely based on GMDH and/or GMDH-type algorithms. The software complex KnowledgeMiner of commercial destination and its recent highly advanced realization [58] contains iterative and several non-parametric GMDH algorithms for fully automatic building and analyzing forecasting models. Another variant of commercial software is GMDHshell [59] based on COMBI and MIA GMDH algorithms. The technology FAKE GAME [47] is intended for construction, investigation and application of inductive evolutionary algorithms of different architectures.

*Real-world applications of inductive modeling.* During the whole period of GMDH evolution this method demonstrated good performance when solving modeling problems for complex processes and systems of different nature in environment, economy, finance, hydrology, technology, robotics, sociology, biology, medicine, and others. Many examples of such modeling results can be found on the ITIM department site [60] in papers presented at conferences and workshops on inductive modeling as well as in the annual issue of collected papers “Inductive modeling of complex systems”.

## **FURTHER DEVELOPMENTS OF INDUCTIVE MODELING METHODS AND TOOLS IN THE ITIM DEPARTMENT**

In 1998, precisely 20 years ago, when the Department for information technologies of inductive modeling (ITIM) was established at the IRTC ITS of NAS of Ukraine, the scientific direction created by O.H. Ivakhnenko obtained its short name «Inductive Modeling» being now generally accepted for scientific forums, articles and books in Ukraine and abroad. This department is the only one in the world which is professionally dealing with the theoretical, technological and applied investigations in this field. Its activity presents the modern stage of functioning the Inductive modeling school and provides the coordination of studies in this area by annually holding International Conferences and Workshops on IM as well as Summer schools for young researchers devoted to issues of the GMDH theory, algorithms and applications. These events take place both in Ukraine and abroad and involve researchers of many countries.

The *research strategy* of the department covers the full life cycle of a scientific research: the methodology of modeling from data samples; the theory of inductive construction of models of optimal complexity; algorithmization of high-performance modeling tools; intellectualization of technologies of constructing models; computer experiments to evaluate the effectiveness of developed technologies; solving real problems of modeling and forecasting; applied implementation of the developed software tools in monitoring, control and decision support systems.

The term *inductive modeling* is defined as a self-organizing process of evolutionary transition from initial data to mathematical models reflecting some functioning patterns of the modeled objects and systems implicitly contained in the available experimental, observational or statistical information under the uncertainty conditions [5]. Instead of the traditional deductive way of solution of modeling tasks «from general theory — to particular model», inductive approach is based on the intensive use of computers as the way «from particular data – to general model».

**Main scientific results** of the ITIM department may be characterized as follows.

*Theory of inductive modeling.* Detailed outcomes concerning conditions of constructing models of optimal complexity were presented in [61] using so called method of critical variances. This main analytical instrument of the inductive modeling theory has made it possible to prove that GMDH is the method of construction of models with minimum variance of the forecasting error. GMDH process enables an automatic adaptation of the optimal model to the level of informativity of a noisy data sample. This makes it possible to classify GMDH as an effective method of data mining and computational intelligence, since it is aimed at

automatic search and description of regularities with the choice of structure and parameters of linear, nonlinear, difference and other models based on data samples under condition of uncertainty and incompleteness of a priori information.

**Enhanced and optimized GMDH algorithms.** An original two-criterion method of redefinition (additional determination) the optimal model choice was elaborated in [62] which enhances the reliability of model building from data.

High-performance sorting-out GMDH algorithms were designed and implemented based on *recurrent* calculations [63], *paralleling* operations [64], *sequential selection* of informative variables [65], and *genetic* procedures of model construction [66]. They all allow enhancing the dimensionality of the real-world problems being solved.

New hybrid architectures of iterative GMDH algorithms were constructed as a generalization of algorithmic structures of multilayered, relaxational and combinatorial types, based on which the *generalized iterative algorithm* GIA GMDH [67] was developed as a neural network with active neurons in the form of the COMBI algorithm for automatic adjustment of a neuron complexity.

The *generalized relaxational iterative algorithm* GRIA GMDH was developed based on the use of high-speed recurrent computations of parameters and external criteria during the multilayer procedure, which allows solving inductive modeling problems from high-dimension data [68].

Theoretical foundations of *intelligent modeling* of complex processes, e.g. socioeconomic ones, under conditions of incompleteness and uncertainty of a priori information are developed based on the use of knowledge bases, means of inductive data analysis and intelligent user interface [69].

An original approach to substantial enhancing the effectiveness of sorting-out GMDH algorithms is based on combined implementation of *recurrent and parallel calculations* [70].

**Developed instrumental tools.** Generally all GMDH-based means allow solving typical tasks of data mining, knowledge discovery and business intelligence. The following tools have been developed:

- complex of software tools [71] for designing, researching and applying modeling methods, conducting experiments on testing modeling methods and their components (model classes, generators of model structures, methods for estimating parameters and models selection criteria).
- software package ASTRID-GIA [72] for inductive modeling of complex systems based on various iterative GMDH algorithms makes it possible to use the generalized algorithm GIA GMDH and all its special cases [69] in online access mode both over the Internet and in the local network.
- computer system of *automated structure and parameter identification* ASPIS [73] for building predictive models on the basis of the high-speed generalized relaxational iteration algorithm GRIA GMDH [68] for solving big data problems.
- software tool for modeling and predicting complex *interrelated processes* on the basis of recurrent-and-parallel GMDH algorithms in the class of dynamic models of vector autoregression [74];
- management decisions informational support system MDISS for solving problems of estimation, analysis and forecasting of the state of complex systems of interrelated socio-economic processes with the purpose of making reasonable managerial decisions [75].

Many of the mentioned above results of ITIM department are reflected in the three monographs dealing with: elaboration, computer-based research and practical application of high-performance sorting-out GMDH algorithms [76]; design, theoretical study, numerical testing and application of the GMDH algorithms of the relaxational type [77]; development and investigation of the generalized iterative algorithm GIA GMDH, construction the interactive software package ASTRID-GIA [78].

**Basic application results.** Various tasks of modeling of complex systems and processes of different nature have been solved, in particular:

- dynamics of interdependent indicators of the energy and investment areas in the class of vector autoregression models for a short-term forecast [74, 75];
- dependence of the sputtering (disruption) coefficient of a spacecraft surface under action of ionized gas jets on the physical properties of the surface coating [76];
- predicting the results of testing blood samples with medicines to determine the most effective for a patient; construction of classifiers for the differential diagnostics of blood diseases [77].
- quantitative assessment of the impact of sea water pollution with bitumoid substances on the total number of species of benthic organisms in the Sevastopol bays [78];
- modeling of the quantity of microorganisms in the soil depending on weather factors and the dose of contamination with heavy metals [79].

## PROSPECTS OF RESEARCH DEVELOPMENT IN THE FIELD OF INDUCTIVE MODELING

The most promising *directions of the research development* may be indicated as follows:

- theory of intellectualization of inductive modeling tools using paradigms of neural networks with active neurons and hybrid architectures of GMDH with evolutionary and multiagent methods;
- theory and high-performance structures of the sorting-out GMDH algorithms on the basis of recurrent-and-parallel and evolutionary calculations;
- methodology, theory and intelligent algorithms for inductive solving tasks of classification and clustering for detecting regularities and automatic analysis of big data;
- intelligent technologies for informational support of making decisions in systems of various nature on the basis of instrumental means of interactive synthesis of inductive modeling algorithms;
- optimal preprocessing procedures to improve the modeling results;
- non-parametric modeling and forecasting based on waited averaging of model ensembles;
- knowledge-based intelligent user interface with strong support and control of user's activity;
- application of the developed means of intelligent modeling in applied problems of analysis and forecast of socioeconomic, ecological and technological processes;
- theory and application of tools for informational support of the decision-making based on inductive modeling methods and algorithms;

– knowledge discovery based on inductive procedures of automated content analysis of messages on Internet, in social networks and textual sources;

It should be noted that the research community dealing with the problem of Deep Learning [80] has recognized that the GMDH created in 1968 by Ivakhnenko is the very first example of a deep learning network with self-organization of its structure, parameters and depth. This fact opens new and very promising prospects for further research developments in the field of inductive modeling.

## CONCLUSIONS

An enormous amount of articles has been published during the 50-years period in the world on the subject of GMDH-based inductive modeling. In this article, structured information was presented on historical aspects of the formation and development of inductive modeling as original scientific direction in Ukraine and abroad, including the ITIM department. Main prerequisites facilitating the creation of the GMDH by O.H. Ivakhnenko were analyzed, basic fundamental, technological and applied achievements of the half-century development of inductive modeling both in Ukraine and abroad were characterized, as well as the most prospective ways of further research were formulated.

GMDH as the main instrument of inductive modeling is an original and effective means of solving a wide range of problems of artificial intelligence. The structure of GMDH is interpreted as a neural network whose originality consists in the self-organization of both its structure and parameters, and it is defined as a kind of architecture of deep learning. Inductive modeling theory refers to the most modern methods of data mining, computation intelligence and soft computing. GMDH-based self-organizing inductive modeling tools represent an original and efficient facility for solving a wide range of artificial intelligence problems including identification and forecast, pattern recognition and clusterization, data mining and search for regularities.

The main objective of scientific research of the ITIM department is developing theoretical and applied bases of designing intelligent tools and technologies for inductive modeling of dynamics of complex interrelated processes based on statistical data for informational support of management decisions in digital economy systems. This objective corresponds to the dominating world trends in the development of technologies for high performance computing, deep learning and big data analysis.

## REFERENCES

1. Ivakhnenko A.G., Müller J.-A. Recent Developments of Self-Organizing Modeling in Prediction and Analysis of Stock Market. *Microelectronics Reliability*. 1997. No. 37. P. 1053–1072.
2. Anastasakis L., Mort N. The Development of Self-Organization Techniques in Modeling: A Review of the Group Method of Data Handling (GMDH). ACSE Research Report 813. The University of Sheffield, 2001. 39 p.
3. Snorek M., Kordik P. Inductive Modelling World Wide the State of the Art. Proc. of 2nd Int. Workshop on Inductive Modelling (Prague, 19–23<sup>rd</sup> of Sept., 2007) Prague, 2007. P. 302–304.
4. Stepashko V. Developments and Prospects of GMDH-Based Inductive Modeling. In: *Advances in Intelligent Systems and Computing II: Selected Papers from the Intern. Conf. on Computer Science and Information Technologies, CSIT 2017, Lviv, Ukraine / N. Shakhovska, V. Stepashko, Editors. AISC book series, Vol. 689. Cham: Springer, 2018, pp. 474–491.*

5. Ivakhnenko A.G. Electroautomatics. Kiev: Gostekhizdat UkrSSR, 1957. 452 p. (In Russian)
6. Ivakhnenko A.G., Petina N.V. Voltage stabilizers with combined control. Kiev: AS UkrSSR publisher, 1958. 247 p. (In Russian)
7. Ivakhnenko A.G. Engineering cybernetics. Kiev: Gostekhizdat UkrSSR, 1959. 432 p. (In Russian)
8. Ivakhnenko A.G., Lapa V.G. Cybernetic predicting devices. Kiev: Naukova dumka, 1965. 213 p. (In Russian)
9. Rosenblatt F. Principles of Neurodynamic: Perceptrons and the Theory of Brain Mechanisms. Washington: Spartan Books, 1962. 616 p.
10. Ivakhnenko A.G. Method of Group Using of Arguments as a Rival of Stochastic Approximation Method. *Avtomatyka*. 1968. № 3. P. 58–72. (In Ukrainian)
11. Ivakhnenko A.G. Group Method of Data Handling as a Rival of Stochastic Approximation Method. *Soviet Automatic Control*. 1968. No. 3. P. 43–55.
12. Ivakhnenko A.G. Heuristic Self-Organization in Problems of Automatic Control. *Automatica (IFAC)*. 1970. No. 6. P. 207–219.
13. Ivakhnenko A.G. Polynomial theory of complex systems. *IEEE Trans. Sys., Man and Cyb.* 1971. 1, No 4. P. 364–378.
14. Ivakhnenko A.G. Heuristic self-organization systems in engineering cybernetics. Kiev: Tekhnika, 1971. 392 p. (In Russian)
15. Ivakhnenko A.G. Inductive method of self-organization of complex systems. Kiev: Naukova dumka, 1982. 296 p. (In Russian)
16. Madala H.R., Ivakhnenko A.G. Inductive Learning Algorithms for Complex Systems Modeling. London, Tokyo: CRC Press Inc., 1994. 384 p.
17. Ivakhnenko A.G., Zaichenko Yu.P., Dimitrov V.D. Decision making based on self-organization. Moscow: Sov. radio, 1976. 280 p. (In Russian)
18. Ivakhnenko A.G., Stepashko V.S. Noise-immunity of modeling. Kiev: Naukova dumka, 1985. 216 p. (In Russian)
19. Ivakhnenko A.G., Yurachkovskiy Yu.P. Modeling of complex systems from experimental data. Moscow: Radio i svyaz, 1987. 120 p. (In Russian)
20. Stepashko V.S. A Combinatorial Algorithm of the Group Method of Data Handling with Optimal Model Scanning Scheme. *Soviet Automatic Control*. 1981. 14(3). P. 24–28.
21. Stepashko V.S. A Finite Selection Procedure for Pruning an Exhaustive Search of Models. *Soviet Automatic Control*. 1983. 16(4). P. 88–93.
22. Shelud'ko O.I. GMDH Algorithm with Orthogonalized Complete Description for Synthesis of Models by the Results of a Planned Experiment. *Soviet Automatic Control*. 1974. 7(5), pp. 24–33.
23. Yurachkovsky Yu.P. Convergence of Multilayer Algorithms of the Group Method of Data Handling. *Soviet Automatic Control*. 1981. 14(3). P. 29–34.
24. Yurachkovsky Yu.P. Restoration of Polynomial Dependencies Using Self-Organization. *Soviet Automatic Control*. 1981. 14(4). P. 17–22.
25. Ivakhnenko A.G. Long-term forecasting and control of complex systems. Kiev: Tekhnika, 1975. 311 p. (In Russian)
26. Ivakhnenko A.G., Karpinsky A.M. Computer-Aided Self-Organization of Models in Terms of the General Communication Theory (Information Theory). *Soviet Automatic Control*. 1982. 15(4). P. 7–15.
27. Stepashko V.S. Potential noise stability of modelling using the combinatorial GMDH algorithm without information regarding the noise. *Soviet Automatic Control*. 1983. 16(3). P. 15–25.
28. Stepashko V.S., Kostenko Yu.V. A GMDH Algorithm for Two-level Modeling of Multidimensional Cyclic Processes. *Soviet Automatic Control*. 1987. 20(4). P. 49–57.
29. Ivakhnenko A.G., Osipenko V.V., Strokova T.I. Prediction of Two-dimensional Physical Fields Using Inverse Transition Matrix Transformation. *Soviet Automatic Control*. 1983. 16(4). P. 10–15.
30. Ivakhnenko A.G. Inductive Sorting Method for the Forecasting of Multidimensional Random Processes and Events with the Help of Analogs Forecast Complexing. *Pattern Recogn. and Image Analysis*. 1991. 1(1). P. 99–108.



31. Ivakhnenko A.G. Kostenko Yu.V. System Analysis and Long-Term Prediction on the Basis of Model Self-organisation (OSA algorithm). *Soviet Automatic Control*. 1982. 15(3). P. 11–17.
32. Ivakhnenko A.G. Objective Computer Clusterization Based on Self-Organisation Theory. *Soviet Automatic Control*. 1987. 20(6). P. 1–7.
33. Vysotskiy V.N., Ivakhnenko A.G., Cheberkus V.I. Long Term Prediction of Oscillatory Processes by Finding a Harmonic Trend of Optimum Complexity by the Balance-of-Variables Criterion. *Soviet Automatic Control*. 1975. 8(1). P. 18–24.
34. Ivakhnenko A.G., Krotov G.I. A Multiplicative-Additive Nonlinear GMDH Algorithm with Optimization of the Power of Factors. *Soviet Automatic Control*. 1984. 17(3). P. 10–15.
35. Kocherga Yu.L. J-optimal Reduction of Model Structure in the Gauss-Markov Scheme. *Soviet J. of Automation and Information Sciences*. 1988. 21(4). P. 34–36.
36. Aksenova T.I., Yurachkovsky Yu.P. A Characterization at Unbiased Structure and Conditions of Their J-Optimality. *Sov. J. of Automation and Information Sciences*. 1988. 21(4). P. 36–42.
37. Ivakhnenko A.G., Kovalchuk P.I., Todua M.M., Shelud'ko O.I., Dubrovin O.F. Unique Construction of Regression Curve Using a Small Number of Points — Part 2. *Soviet Automatic Control*. 1973. 6(5). P. 29–41.
38. Stepashko V.S. Asymptotic Properties of External Criteria for Model Selection *Soviet Journal of Automation and Information Sciences*. 21, No. 6. (1988). P. 84–92.
39. Aksenova T.I. Sufficient conditions and convergence rate using different criteria for model selection, *Systems Analysis Modelling Simulation* 1995. vol. 20, no. 1–2. P. 69–78.
40. Ivakhnenko A.G., Ivakhnenko G.A., Mueller J.A. Self-Organization of Neuronets with Active Neurons. *Pattern Recognition and Image Analysis*. 1994. 4(4). P. 177–188.
41. Muller J.-A., Lemke F. Self-organizing data mining. An intelligent approach to extract knowledge from data. Berlin, Dresden: Libri BoD, 1999. 225 p.
42. Self-organizing methods in modeling: GMDH type algorithms / Ed. S.J. Farlow. New York, Basel: Marcel Decker Inc., 1984. 350 p.
43. Voss M.S., Xin Feng. A new methodology for emergent system identification using particle swarm optimization (PSO) and the group method of data handling (GMDH). Proc. of the Genetic and Evolutionary Computation Conference. Morgan Kaufmann Publishers, 2002. (9–13<sup>th</sup> of July, 2002, New-York). New-York, 2002. P. 1227–1232.
44. Kondo T., Ueno J. Feedback GMDH-Type Neural Network Self-Selecting Optimum Neural Network Architecture and Its Application to 3-Dimensional Medical Image Recognition of the Lungs. Proc. of the II Intern. Workshop on Inductive Modelling IWIM-2007 (Prague, 19–23<sup>rd</sup> of Sept. 2007) Prague, 2007. P. 63–70.
45. Jirina M., Jirina M. jr. Genetic Selection and Cloning in GMDH MIA Method. Proc. of the II Intern. Workshop on Inductive Modelling IWIM 2007 (Prague, 23–26<sup>th</sup> of Sept., 2007) Prague, 2007. P. 165–171.
46. Lytvynenko V., Bidyuk P., Myrgorod V. Application of the Method and Combined Algorithm on the Basis of Immune Network and Negative Selection for Identification of Turbine Engine Surging. Proc. of the II Intern. Conf. on Inductive Modelling ICIM-2008 (Kyiv, 15–19<sup>th</sup> of Sept. 2008). Kyiv, 2008. P. 116–123.
47. Kordik P. Fully automated knowledge extraction using group of adaptive model evolution: PhD thesis. Prague: CTU, 2006. 150 p.
48. Oh S.K., Pedrycz W., Park H.S. Multi-layer hybrid fuzzy polynomial neural networks: a design in the framework of computational intelligence. *Neurocomputing*. 2005. 64. P. 397–431.
49. Zaychenko Yu. The Investigations of Fuzzy Group Method of Data Handling with Fuzzy Inputs in the Problem of Forecasting in Financial Sphere. Proc. of the II Intern. Conf. on Inductive Modelling ICIM-2008. (Kyiv, 15–19<sup>th</sup> of Sept., 2008). Kyiv, 2008. P. 129–133.
50. Bodyanskiy Ye., Vynokurova O., Teslenko N. Cascade GMDH-Wavelet-Neuro-Fuzzy Network. Proc. of the IV Intern. Workshop on Inductive Modelling IWIM-2011 (Kyiv-Zhukyn, 4–11<sup>th</sup> of July, 2011). Kyiv-Zhukyn, 2011. P. 16–21.
51. Voytyuk I., Dyvak M., Spilchuk V. The Method of Structure Identification of Macromodels as Difference Operators Based on the Analysis of Interval Data and Genetic Algorithm. Proc. of the IV Intern. Workshop on Inductive Modelling IWIM-2011 (Kyiv-Zhukyn 4–11<sup>th</sup> of July, 2011). Kyiv-Zhukyn, 2011. P. 114–118.

52. Lemke F. Parallel Self-Organizing Modeling. Proc. of the II Int. Conf. on Inductive Modelling ICIM-2008 (Kyiv, 15–19<sup>th</sup> of Sept. 2008). Kyiv, 2008. P. 176–183.
53. Koshulko O.A., Koshulko A.I. Multistage combinatorial GMDH algorithm for parallel processing of high-dimensional data. Proc. of III Int. Workshop on Inductive Modelling IWIM-2009(15–19<sup>th</sup> of Sept., 2009, Krynica). Krynica, Poland, 2009. Prague: CTU, 2009. P. 114–116.
54. Kordik P., Černý J. Advanced Ensemble Strategies for Polynomial Models. Proc. of the III Intern. Conf. on Inductive Modelling ICIM-2010 (Yevpatoria, 16–22<sup>nd</sup> of May, 2010). Yevpatoria, 2010. Kherson: KNTU, 2010. P. 77–82.
55. Čepek M., Kordik P., Šnorek M. The Effect of Modelling Method to the Inductive Preprocessing Algorithm. Proc. of the III Intern. Conf. on Inductive Modelling ICIM-2010. (Yevpatoria, 16–22<sup>nd</sup> of May 2010) Yevpatoria, 2010. Kherson: KNTU, 2010. P. 131–138.
56. Sarychev A.P. System Regularity Criterion of Group Method of Data Handling. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2006. 38(11). P. 25–37.
57. Sarycheva L. Quality Criteria for GMDH-based Clustering. Proc. of the II International Conference on Inductive Modelling ICIM-2008 (Kyiv, 15–19<sup>th</sup> of Sept., 2008), Kyiv, 2008.
58. Lemke, F. Insights v.2.0, Self-organizing knowledge mining and forecasting tool, 2013.URL: <http://www.knowledgeminer.eu>. (Last accessed: 01.11.2018)
59. URL: <https://www.gmdhshell.com>. (Last accessed: 15.11.2018)
60. URL: [www.mgua.irtc.org.ua](http://www.mgua.irtc.org.ua) (Last accessed: 01.12.2018)
61. Stepashko V.S. Method of Critical Variances as Analytical Tool of Theory of Inductive Modeling. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2008. 40(2). P. 4–22.
62. Ivakhnenko A.G., Savchenko E.A. Investigation of Efficiency of Additional Determination Method of the Model Selection in the Modeling Problems by Application of the GMDH Algorithm. *Journal of Automation and Information sciences*. 2008. 40(3). P. 47–58.
63. Stepashko V.S., Efimenko S.M. Sequential Estimation of the Parameters of Regression Models. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2005. 41(4). P.631–634.
64. Stepashko V., Yefimenko S. Parallel algorithms for solving combinatorial macromodeling problems. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*. 2009. 85(4). P 98–99.
65. Samoilenko O., Stepashko V. Method of Successive Elimination of Spurious Arguments for Effective Solution the Search-Based Modelling Tasks. Proc. of the II Intern. Conf. on Inductive Modelling ICIM-2008 (Kyiv,15–19<sup>th</sup> of Sept. 2008), Kyiv, 2008. P. 36–39.
66. Moroz O., Stepashko V. Hybrid sorting-out algorithm COMBI-GA with evolutionary growth of model complexity. In: *Advances in Intelligent Systems and Computing II: Selected Papers from the International Conference on Computer Science and Information Technologies, CSIT 2017, Lviv, Ukraine / N. Shakhovska, V. Stepashko, Ed. AISC, Vol. 689. Cham: Springer, 2018. P. 346–360.*
67. Stepashko V., Bulgakova O., Zosimov V. Construction and Research of the Generalized Iterative GMDH Algorithm with Active Neurons. In: *Advances in Intelligent Systems and Computing II: Selected Papers from the International Conference on Computer Science and Information Technologies, CSIT 2017, Lviv, Ukraine / N. Shakhovska, V. Stepashko, Editors. AISC book series, Vol. 689. Cham: Springer, 2018. P. 492–510.*
68. Pavlov A.V. Generalized relaxational iterative algorithm of GMDH. *Inductive Modeling of Complex Systems. Collected papers. Issue 3*. Kyiv: IRTC ITS NASU, 2011. P. 121–134. (In Ukrainian)
69. Stepashko, V.S.: Conceptual fundamentals of intelligent modeling. *Control Systems and Machines (USiM)*. 2016. 4, pp. 3–15. (In Russian)
70. Yefimenko S.N., Stepashko V.S. Fundamentals of recurrent-and-parallel computing in the combinatorial algorithm COMBI GMDH. *USiM*. 2014. 6. P. 27–33. (In Russian)
71. Yefimenko S.N., Stepashko V.S. Simulation experiment as a means of effectiveness research of modeling methods from observation data. *USiM*. 2009. 1. P. 69–78. (In Russian)
72. Bulgakova O., Zosimov V., Stepashko V. Software package for modeling of complex systems based on iterative GMDH algorithms with the network access capability. *System Research and Information Technologies*. 1. 2014. P. 43–55. (In Ukrainian)
73. Pavlov A. Designing an automated structural-parametric identification system. *Inductive Modeling of Complex Systems. Collected papers. Issue 7*. Kyiv: IRTC ITS NASU, 2015. P. 202–219. (In Ukrainian)

74. Yefimenko S. Building Vector Autoregressive Models Using COMBI GMDH with Recurrent-and-Parallel Computations. In: Advances in Intelligent Systems and Computing II: Selected Papers from the International Conference on Computer Science and Information Technologies, CSIT 2017, Lviv, Ukraine / N. Shakhovska, V. Stepashko, Editors. AISC book series, Vol. 689. Cham: Springer, 2018. P. 601–613.
75. Stepashko V., Samoilenko O., Voloschuk R. Informational Support of Managerial Decisions as a New Kind of Business Intelligence Systems. In: Computational Models for Business and Engineering Domains. G. Setlak, K. Markov (Eds.). Rzeszow, Poland; Sofia, Bulgaria: ITHEA. 2014. P. 269–279.
76. Moroz O., Stepashko V. Data reconstruction of seasonal changes of amyolytic microorganisms amount in copper polluted soils. Proc. of the 13<sup>th</sup> IEEE Intern. Conf. CSIT-2018 & International Workshop on Inductive Modeling. (Lviv, 11–14<sup>th</sup> of Sept., 2018), Lviv, 2018. P. 479–482.
77. Stepashko V.S., Yefimenko S.M., Savchenko Ye.A. Computerized experiment in inductive modeling. Kyiv: Naukova Dumka, 2014. 222 p. (In Ukrainian)
78. Pavlov A.V., Stepashko V.S., Kondrashova N.V. Effective methods of models self-organization. Kyiv: Akadempriodika, 2014. 200 p. (In Russian)
79. Stepashko V.S., Bulgakova O., Zosimov V. Iterational algorithms of inductive modeling. Kyiv: Naukova Dumka, 2014. 190 p. (In Ukrainian)
80. Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: An overview. *Neural Networks*. 2015. 61, pp. 85–117.

Received 20.09.2018

Степашко В.С., д-р техн. наук, професор

зав. відд. інформаційних технологій індуктивного моделювання,

e-mail: stepashko@irtc.org.ua

Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій  
та систем НАН України та МОН України,

пр. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна

#### ФОРМУВАННЯ І РОЗВИТОК САМООРГАНІЗОВНИХ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ІНДУКТИВНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

**Вступ.** Ефективне розв'язання завдань керування та прийняття рішень у складних системах має використовувати результати математичного моделювання. Для побудови адекватних прогнозних моделей є багато сучасних методів та інструментів, які, як правило, базуються на двох основних підходах: керовані теорією (дедуктивні) та керовані даними (індуктивні). Методи, керовані даними, є основними для розв'язання типових задач аналізу даних; вони реалізують індуктивний процес переходу від конкретних даних до моделей, що узагальнюють ці дані. Серед усіх таких методів досить примітними є ті, що розробляються в рамках індуктивного моделювання на основі методу групового урахування аргументів (МГУА), створеного кілька десятиліть тому академіком О.Г. Івахненком.

**Метою дослідження** є аналіз передумов винайдення МГУА О.Г. Івахненком та еволюції ідей, методів та інструментів самоорганізації моделей протягом піввікового історичного періоду успішного розвитку методології індуктивного моделювання.

**Результати.** Знання, набуті О.Г. Івахненком у галузях автоматичного керування, інженерної кібернетики та зароджуваної нейронауки, ініційованої ідеями персептрона, були тими передумовами, які допомогли йому синтезувати оригінальний самоорганізований підхід до розв'язання завдань побудови моделей об'єктів і процесів на основі експериментальних даних. У роботі проаналізовано еволюцію наукових ідей та основні досягнення у розвитку МГУА в період 1968–1997 років. Охарактеризовано внесок науковців з різних країн у модифікацію та застосування МГУА. Наведено результати подальшого розроблення методів та інструментів індуктивного моделювання у відділі інформаційних технологій індуктивного моделювання і вказано найперспективніші напрями досліджень у цій галузі.

**Висновки.** Проаналізовано основні передумови, що сприяли створенню МГУА О.Г. Івахненком, охарактеризовано основні фундаментальні, технологічні та прикладні досягнення півстолітнього розвитку індуктивного моделювання як в Україні, так і за кордоном, а також сформульовано найбільш перспективні шляхи подальших досліджень.

**Ключові слова:** математичне моделювання, моделювання на основі даних, самоорганізація моделі, МГУА, індуктивне моделювання, завадостійке моделювання, інформаційні технології, прикладне дослідження.

Степашко В.С., д-р техн. наук, професор,  
зав. отд. информационных технологий индуктивного моделирования,  
e-mail: stepashko@irtc.org.ua  
Международный научно-учебный центр информационных  
технологий и систем НАН Украины и МОН Украины,  
пр. Акад. Глушкова, 40, г. Киев, 03187, Украина

#### ФОРМИРОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИНДУКТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Целью работы является анализ эволюции идей, методов и инструментов самоорганизации моделей в течение полувекowego исторического периода успешного развития методологии индуктивного моделирования. Проанализированы основные предпосылки создания академиком А.Г. Ивахненко метода группового учета аргументов (МГУА), исследуется эволюция его научных идей и взглядов, а также основные достижения в развитии МГУА в период 1968–1997 годов. Охарактеризован вклад исследователей разных стран в модификацию и применение МГУА. Приведены результаты дальнейших разработок методов и инструментов индуктивного моделирования в отделе Информационных технологий индуктивного моделирования и указаны наиболее перспективные направления исследований в этой области.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, моделирование на основе данных, самоорганизация модели, МГУА, индуктивное моделирование, помехоустойчивое моделирование, информационные технологии, прикладное исследование.

DOI: [https:// 10.15407/kvt194.04.061](https://10.15407/kvt194.04.061)

UDC 004.75+004.932.2:616

**KOZAK L.M.**, DSc (Biology), Senior Researcher,  
Leading Researcher, the Medical Information Systems Department  
e-mail: [lmkozak52@gmail.com](mailto:lmkozak52@gmail.com)

**KOVALENKO A.S.**, DSc (Medicine), Professor,  
Head of the Medical Information Systems Department  
e-mail: [askov49@gmail.com](mailto:askov49@gmail.com)

**KRYVOVA O.A.**, Researcher,  
the Medical Information Systems Department  
e-mail: [ol.kryvova@gmail.com](mailto:ol.kryvova@gmail.com)

**ROMANYUK O.A.**, Junior Researcher,  
the Medical Information Systems Department  
e-mail: [ksnksn7@gmail.com](mailto:ksnksn7@gmail.com)  
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. Glushkov av., 40, Kiev, 03187, Ukraine

## DIGITAL TRANSFORMATION IN MEDICINE: FROM FORMALIZED MEDICAL DOCUMENTS TO INFORMATION TECHNOLOGIES OF DIGITAL MEDICINE

---

**Introduction.** According to the Concept of Ukraine's Digital Economy and Society Development in 2018-2020, the key components of "digitalization" are the development of digital infrastructure — broadband Internet throughout Ukraine, and the promotion of digital transformations in various sectors of the economy and society, including medicine.

**The purpose** of the paper is to analyze the stages of digital transformation in medicine and the results of authors and their colleagues of the MIS department for the development of information technologies of digital medicine.

**Results.** A generated model of digital transformation in medicine is presented and several main stages of this transformation are highlighted: I — digital transformation of primary medical information; II — development of support systems for the diagnostic and treatment process; III — development of technologies and systems for supporting the physicians' activities with digital information; IV — mobile medicine; V — the digital medicine

globalization. The method of determining the markers of the functional state of the cardiovascular system based on mathematical models of forecasting and classification with the use of Data Mining is proposed. The method allows detecting and determining the prognostic values of ECG parameters of the CVS functional state for different groups of patients. The developed IT for supporting the processes of receiving, transmitting and storing digital medical images is aimed at ensuring the effective operation of a physician with digital information from various sources: functional diagnostic complexes, digital medical data storage and images using Picture Archiving and Communication Systems (PACS) and cloud technologies. The proposed telemedicine systems theory including the formulated principles of organizing these systems, criteria and methods for analyzing digital medical data has been implemented for elaborating and functioning the Telemedicine Center. It enables to cover the population in more than 20 Ukraine's regions with qualified medical assistance.

**Conclusions.** The digital transformation in medicine like any new process takes place with a gradual complication of tasks, methods and means of their implementation: from formalization of primary medical information to improvement of methods of its analysis, transfer and storage to improve the quality of medical care for patients at any point of the world.

**Keywords:** digital transformation in medicine, formalized medical records, Data Mining, IT for assessing human state and physiological systems' state, telemedicine, m-medicine.

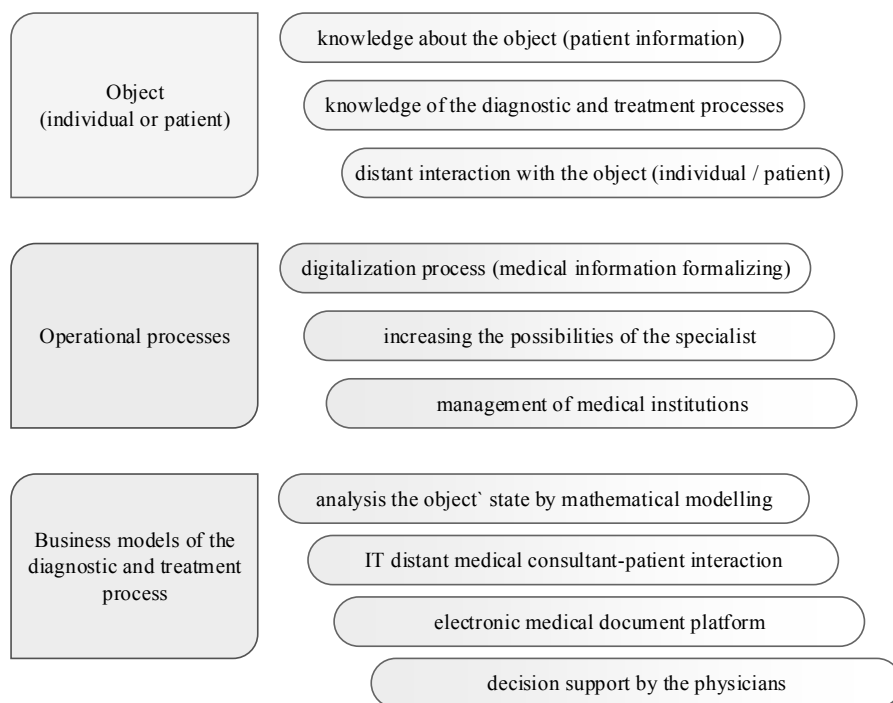
## INTRODUCTION

Today, Ukraine's pace of transition to high-tech industries and efficient processes is increasing using IT technologies and communications. According to the Concept of Ukraine's Digital Economy and Society Development in 2018-2020, the key components of "digitalization" are the development of digital infrastructure — broadband Internet throughout Ukraine, and the promotion of digital transformations in various sectors of the economy and society, including medicine [1]. On the way to the digital society, it is necessary for Ukraine to combine the possibilities of domestic production with the possibility of wide use and consumption of communication and digital technologies. The experience of many world countries and the results of the implementation of products, designed by Ukrainian specialists, demonstrate the unique opportunities that digital medicine provides for increasing the efficiency of medical care.

More than 50 years ago, on the initiative of academicians V.M. Glushkov and N.M. Amosov, a new direction of scientific research — biological and medical cybernetics, was founded. During these years, scientists of the Medical Information Systems Department of the International Research and Training Center for Information Technologies and Systems have carried out research, have developed and implemented methods and means of formalization and information support for diagnostic and treatment processes.

## PROBLEM STATEMENT

The modern world is rushing into the process of digital transformation (DT). First of all, this process covers the commercial activities of modern society. In their fundamental report, "Digital Transformation: A Roadmap for Organizations with Billion Turnovers", which was named as one of the top five intellectual ideas of the decade according to Whitespace/Source.com., George Westerman, Didier Bonnet, Andrew McAfee defined digital transformation for the sphere of production and management as the use of modern technologies for drastically increasing the productivity and



**Fig. 1.** Digital transformation model in medicine

value of enterprises [2]. The authors identified three key areas of enterprise activity in the digital transformation: customer experience, operational processes and business models, described the components of these areas and concluded that digital technologies combined with integrated information allow companies to obtain a global synergistic effect, while retaining the ability to react sensitively to local changes. Only some components of this model are currently implemented, the digital transformation is developing. There is a further expansion of the functions used and components of the DT.

Digital medicine (DM) as branch of digital transformation is an extremely specific area not only according to the subject, but also to the quality of the information analysed. Therefore, we define the main components of the digital transformation model (DTM) in medicine, taking into account its tasks and terminology (Fig. 1).

**Digital medicine** is a set of methods, technologies and technical means of computer support for the treatment and diagnostic processes, the use of which dramatically increases the efficiency of providing medical care to a specific individual/patient, as well as to the whole population or some population groups.

We have identified several main stages in digital medicine developing: I — digital transformation of primary medical information; II — development of support systems for the diagnostic and treatment processes; III — development of technologies and systems for supporting the physician's activities with digital information; IV — mobile medicine; V — the digital medicine globalization. These stages do not have clear boundaries and can occur simultaneously when solving problems of different levels or with different degrees of preparedness of digital medicine users — medical institutions, medical workers and patients.

The purpose of the article is to analyse the stages of digital transformation in medicine and authors' contribution to the development of information technologies of digital medicine.

## **DIGITAL TRANSFORMATION OF PRIMARY MEDICAL INFORMATION**

At this stage, digital medicine has been developing both technically and informationally. In accordance with the proposed DT model, the "Operational processes of the CM" (the digitalization of qualitative medical information, management of medical institutions) and the "Business-models of the medical processes" (Electronic medical document platform) are included.

As a part of the *technical component*, diagnostic devices giving information about the patient's health and certain physiological systems not in analogue (traditional recordings of cardiogram, encephalogram, electromyogram, etc.), but in digital form were developed.

At the same time, methods for primary processing of the received information (*information component*) were developed.

The beginning of the information component implementation was the stage of *formalization of medical information*: medical data and records, medical documents, the creation of a formalized medical history based on in-depth analysis of a patient data.

These tasks, in particular, were solved in the Medical Information Systems Department in the second half of the twentieth century. The monograph "Medical Information Systems" edited by Academician N. M. Amosov and Professor Popov A.A. that laid the foundation for the methods of formalizing medical information was first published in 1971 and republished [3]. This monograph raised a questions and gave the first decisions on the transformation of medical data presentation forms, the organization of their automated processing, the creation of formalized medical cards for some nosological groups and approaches to the development of mathematical software for medical information system.

Approaches to and methods for transforming qualitative medical information into quantitative, digital records were formed. These methods of medical data formalization became the basis for the development of standardized medical documents (health passport), as well as the creation of electronic medical records. Standardized cards for various diseases and Standardized resort card and other cards were created. Automated systems for entering, recording and storing patient's data were developed. Today, similar methods have been applied in developing the standard for open EHR electronic medical records (Australia).

## **DEVELOPMENT OF SUPPORT SYSTEMS FOR THE DIAGNOSTIC AND TREATMENT PROCESSES**

The beginning of this stage was laid down in the middle of the last century by few developments, now this process covers all areas of medicine, work is being carried out to create and improve DM diagnostic complexes: increasing the accuracy of analysis and diagnostics, expanding the tasks, improving usability and non-invasiveness. The development of such complexes covers a wide range of objectives, and primarily on the components of the GT model "Object" (knowledge about the object — about the patient) and "Business models of the diagnos-



tic and therapeutic process” (using mathematical modeling methods to analyze the state of the object).

Note the enlarged groups of tasks and the results obtained by employees of MIS Department in each direction. In the 70–80 years of the twentieth century, the first in the USSR models of the course of myocardial infarction were developed based on electrocardiographic and biochemical data, which made it possible to foresee its dynamics [4]. These models were implemented into the clinical practice of the Kyiv Strazhesko Research Institute of Cardiology.

At the same time, theoretical and practical bases for the analysis of the electric field of the heart were developed using mathematical models, which made it possible to create methods for automated analysis of ECG. Software realizing the proposed algorithms was developed for the first time.

Of particular note are the problems of disaster medicine, a solution that was based on long-term (since the 70s of the last century) studies, analysis and modeling of the influence of external factors on the state of biosystems of different levels by Vasilik P.V. He created a theory of the influence of heliogeomagnetic factors on biosystems, which combines the principle of multichannel influence of solar activity on living organisms, including human, the hypothesis about the wave component of the gravitational field and the presence of a channel of non-electromagnetic nature, along with the electromagnetic channel [5]. This made it possible to predict the occurrence of epidemics, acceleration process, and climate change on Earth [6]. According to the results of the analysis of accident data on various public infrastructure objects, periodograms of time series were calculated and it was determined that there are rhythms in land and air transport accidents, which will reduce the probability of emergency situations and, consequently, the level of injuries [7].

Studies of changes in the state of an individuals and several physiological systems using methods of mathematical modeling were carried out and their results have formed the basis of decision support information technology in the field of preventive medicine. Developed IT for assessing the psychophysiological state of students to support the activities of psychologists in middle and high schools [8–9], functional state models of the operators with high visual strain to identify asthenopic disorders [10–11], IT for assessing of the population medical and demographic state under the influence of various factors, which serve as the basis for the formation of information support for management decision-making in the health care system [12–15].

In recent years, we have developed the **method for determining markers of the cardiovascular system functional state**, which is based on mathematical models of communication of the ECG signs [16] and comprehensive assessments of the regulation, state and reserves of the myocardium.

For prenosological diagnostics, it is important to carry out a comprehensive assessment of the functional state (FS) of the cardiovascular system (CVS), based both on the study of heart rate variability (HRV) [17] and on in-depth analysis of 6, 12-channel ECG recordings [18].

A large amount of the initial data set (more than 300 ECG signs) and the need for standardization of indicators into the interval deviation scale necessitated the development of a multivariate method for analysis the functional state of the CVS using Data Mining methods (DM). The peculiarity of medical data is a large num-

ber of various interrelated parameters, often for small groups of observations. Data Mining methods are more efficient for the selection of informative features, since, unlike the statistical ones, there are no prerequisites for the data. Data processing methods allow us to build a large number of prognostic models for both large and small groups of observations. This allows us to obtain in an accessible form a new knowledge that may be introduced into clinical practice.

The method combines the following stages.

*Stage I. Data preparation.* The objectives of this phase are:

- primary processing, which covers the cleaning, transformation, identification of missing data, recoding;
- standardizing of primary indicators using an interval scale;
- defining target (dependent) variables and a set of independent indicators;
- dividing data into training and examination, testing samples in the case of large samples (databases).

*Stage II. Clustering Data.* Segmentation includes the following steps.

2.1. The division of the sample of patients into typological groups is carried out according to complex indicators (vegetative regulation state, estimates of the myocardium and its reserves) and/or disease severity. To distribute patients into groups, the  $k$ -Means method is used, which is implemented in the DM module. This method makes it possible to calculate the optimal division into groups according to the following criteria:

- Criterion for calculating cluster centres with minimization of the target function:

$$F_1 = \sum_{n=1}^k \sum_{x_i \in X_n} \|\mu_i - \mu_n\|^2 \rightarrow \min,$$

where  $n$  is the number of objects to be divided into  $k$ -groups (clusters),  $F_1$  is the sum of squares of distances between each object  $x_i$  and the centre of the cluster  $\mu_n$  to which it belonged at each iteration;

- Criterion of the largest sum of distances between clusters:

$$F_2 = \sum_{n,i=1}^k \|\mu_i - \mu_n\|^2 \rightarrow \max.$$

2.2. In contrast to the classical  $k$ -Means method, in this method we additionally included a cross-check for  $n$  random samples, which allows minimizing the error and choosing the optimal number of clusters. Optimization is carried out before solving for clusters  $k+1$ , at which the error function (average distance to cluster centres) is not more than 5% better compared with the solution of clusters  $k$ . Then the solution with  $k$  clusters will be optimal and final.

2.3. Standardization of variables is carried out to convert it to the range from 0 to 1:

$$z_i = \frac{x_i - x_{\max}}{x_{\max} - x_{\min}}.$$

The distance between objects and cluster centres is calculated using the Euclidean distance.

The results of this stage make it possible to identify and analyse the typological features of the selected clusters, taking into account such indicators as evaluation of the CVS regulation, myocardial state (level of adaptation) and others for the subsequent determination of predictors (the most informative signs) on the basis of which violations of the regulation of cardiovascular system and of myocardium state can be forecasted.

*Stage III. Building models.* This stage is aimed at identifying predictors and combines several steps.

### 3.1. Feature Selection:

- identifying important predictors from a variety of prognostic features;
- removing unnecessary predictors.

3.2. Building models (forecast and classification) may be carried out using several approaches: Neural Networks, Method of Classification and Regression Trees, Boosted Trees.

3.3. Evaluation and comparison of simulation results to determine the optimal model (for performance and complexity).

In this investigation, we use the Method of Classification and Regression Trees (C & RT). The method of decision trees is a hierarchical and flexible means of predicting the belonging of objects to a certain class or predicting the values of quantitative variables. This method allows us to get a model, which is a set of rules "IF (A) THEN (B)", where A is a logical condition, B is a subdivision procedure a subset into two parts, for one of which condition A is true, and for the other, it is wrong. The results are easy to interpret because the rules are presented in the form of a graphic structure (tree).

The construction of the tree goes from top to bottom by applying a recursive procedure to a training sample (size  $N$ ) using the following algorithm.

Selecting the threshold value of the variable  $x = A$  will provide "optimal partitioning" according to a certain criterion for the target variable  $y$ .

For regression trees, the function of estimating the quality of a partition is the sum of squared deviations or the mean square error:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2.$$

For classification trees (target variable is categorical), the Gini index or the statistical criterion  $\chi^2$  can be chosen as such a criterion:

$$Gini(d) = 1 - \sum_{i \neq j}^k p_i^d p_j^d,$$

where  $p_i$  is the classification probability at node  $d$  as  $i$  or  $j$ ,  $Gini(d)$  is the degree of uncertainty reduction at node  $d$ .

Separation of data into subsets is applied for each subset (internal node).

Thus, the algorithm for constructing decision trees allows us to define a set of characteristic values (attributes) that separate one data category from another. This process is called segmentation.

The depth of the tree (its size) depends on the amount of data. The more branches a tree has, the better results of its testing on a training sample will be, but less successful they will be on an examination sample. Therefore, the con-

structed model should also be optimal in size, that is, it should contain information that improves the quality of recognition, and should ignore the information that does not improve it. To do this, tree pruning is done.

A peculiarity of the C & RT algorithm is the choice of the optimal tree size using cross-validation.

*Stage IV. Verification of the classification model.*

At this stage, the selected model with the optimal set of predictors is compared with the previously obtained division into typological groups (clusters of the II stage) or with the patient's state (severity of the disease). The confusion matrix is calculated on typological groups obtained at the II and III stages.

Thus, the proposed method allows the construction of predictive and classification models of the relationship of complex indicators of the cardiac activity regulation, assessments of the myocardium state and its reserves with ECG indicators, the analysis of these models makes it possible to study the peculiarities of the cardiac activity regulation.

*The method was used* to analyze the functional state of the CVS of children with rheumatic diseases according to the signs system of a 6-channel ECG. The results of the clinical and instrumental examination of children (41 children with rheumatic diseases) who were hospitalized at the Institute of Pediatrics, Obstetrics and Gynecology of the Academy of Medical Sciences of Ukraine were the basis for developing models of the relationship of the studied parameters according to the proposed method. ECGs were recorded and analyzed using the "Cardio Plus P" software and hardware complex with the Cardio ORAKUL software. The "Cardio-plus P" registers a large number of amplitude-time parameters, frequency indicators, characteristics of the in-depth analysis of the ECG, and with the help of computer programs it calculates a multi-level system of ECG estimates. The analysis is carried out according to the hierarchical system of ECG assessments proposed in [18]. The system under study identifies four blocks of indicators.

*Block of heart rate variability (HRV).* HRV indices reflect the work of the cardiovascular system and the mechanisms of regulation of the whole organism. The HRV method is widely used in functional diagnostics, mass prenosological surveys, for rapid diagnosis. These are indicators of temporal, spectral, geometric analysis, as well as measures of nonlinear analysis of the heart rhythm complex dynamics. On their basis, two secondary indicators are formed — operational control of regulation and the state of regulation reserves, the third generalizing indicator — a comprehensive regulation assessment, is formed from them [16, 18].

*The block of amplitude-time ECG indicators* has more than 130 signs. It is known that a complex of ECG amplitude-time indicators may be the markers of the risk of adverse cardiovascular events (sudden death, myocardial infarction, heart failure). This complex characterizes the regulation of the heart (operative control of the myocardium state and reserves), and the degree of compliance of these indicators with the norm is a measure of the functional reserve.

Based on the primary features of these two blocks, comprehensive assessments of the HRV regulation, myocardial conditions and indicators of in-depth ECG analysis are formed.

The following blocks combine ECG signs of cardiac arrhythmias and psycho-emotional indices. The final assessment is an integral indicator of the FS of the CVS. It is formed as a linear convolution of complex indicators and other ECG signs.

The algorithm for calculating the complex indicators system as a method of electrocardiogram universal score evaluation was proposed and described in detail in [20]. According to the specified system of indicators, forecast and classification models were constructed. The model in the form of a decision tree clearly represents the rules for classifying observations, and the regression tree shows the dependence of the target variable on the predictors. Each classifying rule reflects a certain regularity that is hidden in empirical data.

Let us give a solution to one of the research problems. Figure 2 shows the regression tree calculated by the C & RT algorithm for a complex indicator (assessment) of the myocardium state. This tree obtained by cross-validation (10-fold cross-validation), is optimal both in size and in the number of predictors. Teaching data set — 41 children. The predictors are 5 signs:

- 1) the integral indicator of the form STT (lead II) integral form indicator STT (lead II);
- 2) ECG wave amplitude index (lead AvF) ECG wave amplitude index (V AvF));
- 3) T wave amplitude (lead II);
- 4) ST segment offset 0.08 sec after point J (lead II) ST-segment depression at 80 ms after the J-point (V II)
- 5) angle  $\alpha$ T in the frontal plane (lead II).

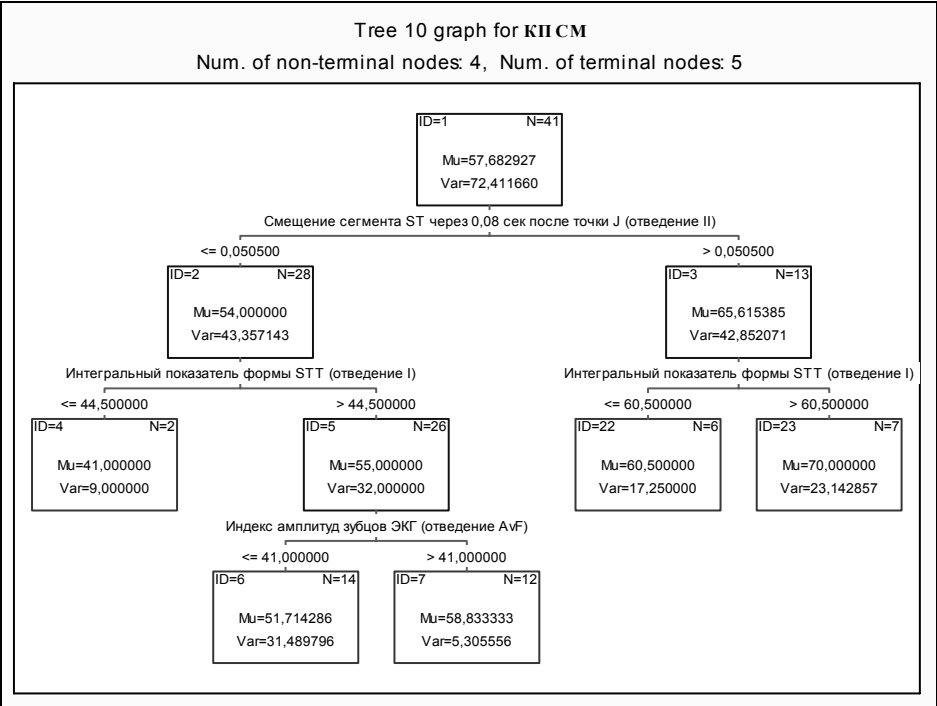


Fig. 2. Regression tree for a complex indicator (assessment) of the state of the myocardium

The root node indicates the average value of the complex indicator of the myocardium state (CIMS) of a group of children with rheumatic diseases (CIMS = 57.6%). The value of the indicator “ST segment displacement after 0.08 s after point J” equal to 0.05 mV determines the division into two main groups (with low and higher myocardial scores).

The method allows to indicate the ECG predictors of the cardiovascular system functional state according to estimates of vegetative regulation, the state of the myocardium and its reserves, to determine the boundary values of these predictors for different groups of patients, as well as to identify different functional classes.

## **DEVELOPMENT OF INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS TO SUPPORT THE PHYSICIAN'S ACTIVITIES WITH DIGITAL MEDICAL DATA**

The development of this stage corresponds to the components of the DTM model — “Object: patient” (knowledge of the treatment and diagnostic process) and “Operational processes” (increasing the possibilities of a specialist; managing the medical institutions activities).

### **1. The level of medical institutions**

Over the past 30 years, a large number of complex medical systems (CMS) have been developed. The implementation effectiveness of these CMS depends on their compliance with the real needs of the medical institution, so CMS functional content must be analyzed at the pre-project stage [19]. Recently the main efforts have been made to ensure the effective information exchange between different systems and modules. It is the reliability of this exchange that will enable the physician to use the necessary set of various digital medical data for the diagnosis and treatment of patients.

Digital medical data includes, in addition to clinical and laboratory data, such large groups as digital medical signals and digital medical images (DMI). A large amount of unique medical information comes to the physician in the medical images form. It should be emphasized that such information will be sufficient for analysis only if there is metadata that links the images with complete patient data, time and means of obtaining these images. The necessary conditions for the diagnostic process are the unification of medical data, convenient storage and data lossless transmission both across the hospital's local network and between different medical institutions using the standard for regulating the creation, storage, transmission and visualization of medical images and documents — Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM) [20].

Solving various problems of information support of providing medical care to patients of the Hospital for Scientists of the National Academy of Sciences of Ukraine has been the subject of our research and development for more than 20 years. A Hospital information network combining a medical information system (MIS), diagnostic digital devices of various modalities with a DICOM prefix and a medical image storage module has been developed. To ensure the interaction of old-style equipment (without using the DICOM standard), a module has been developed for the transmission and conversion to digital medical images, which allows communication with the Conquest DICOM Server and supporting the necessary functions of operating with data and digital medical images.

The main task of the *developed information technology for supporting the processes of receiving, transmitting and storing digital medical information* is to ensure effective work of the physicians with digital information from various sources: diagnostics complexes, digital medical data and image storage using Picture Archiving and Communication Systems (PACS) and cloud technologies. The use of this technology provides the organization of long-term storage of digital medical images obtained from diagnostic systems, and the ability to use this medical information by the physician at his workplace in the current treatment and diagnostic process [21, 22].

## 2. Telemedicine — interregional level

The theory of telemedicine (TM) systems developed by us includes the formulated principles of TM systems organization (principles of hierarchy, adaptability, fractality and scaling), criteria and methods for analyzing digital medical data [23, 24].

The principle of hierarchical construction of the TM network allows to coordinate its structure with the organization of the health care system, in the information environment of which the TM network functions. The principle of adaptability provides the opportunity to develop the network using new technological platforms to expand the target space and increase the efficiency of medical care by upgrading the information and communication basis of TM technologies. The principle of fractality provides a “vertical” similarity to different levels of the structure of the MT network and determines the flexible process of preparing and exchanging medical data by implementing the similarity function. According to the principle of scaling, the “horizontal” organization of the MT network is carried out, ensuring the possibility of replication of software products at the regional level and at the level of individual medical institutions.

There are several levels of telemedicine institutions that are interconnected technically, informationally and documentally. The first level of the TM network includes telemedicine centres or nodes located in different districts and regions of the country (*Counseling Objects*). *Counseling Subjects* are medical institutions that provide consulting services and have a staff of highly qualified medical specialists in various fields of medicine, as well as appropriate equipment for remote consultations, medical diagnostic procedures and organization of training for network users. This is the second level of the MT network and organization can be both objects and subjects of counseling. At the third level, there is the Telemedicine Center of the Ministry of Health of Ukraine, which includes a dispatch center and also carries out scientific and methodological activities.

The introduction of this IT into the work of the Telemedicine Center of the Ministry of Health of Ukraine enabled to provide the population of more than 20 regions of Ukraine with qualified medical assistance.

## 3. Harmonization of medical informatics standards

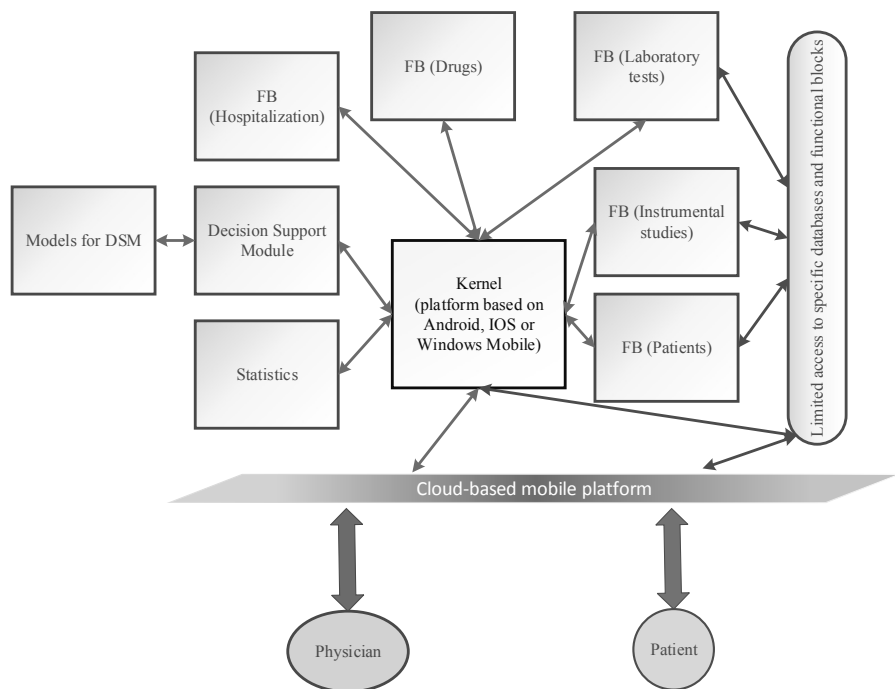
To integrate MISs into a single network and to enter the international information space, it is necessary to ensure the standardization of information carriers and the transmission of medical images. On the basis of international standards Health Level 7 and DICOM, we harmonized standards in the field of medical statistics and health informatics. Harmonized standards are focused on defining data types for information exchange, defining requirements for the general structure of biometric data exchange formats, presenting units of measure for data exchange between computer applications, requirements for drugs dictionary

systems for healthcare and to electronic prescriptions. Such standards are essential for the development of mobile medicine.

**MOBILE MEDICINE**

At the present stage, the development of mobile intelligent information technologies (IIT) for digital medicine is underway. The basic structure of any mobile application consists of a kernel (platform based on Android, IOS or Windows Mobile) and functional blocks that are formed taking into account the specific tasks of this mobile application for a specific group of users (Fig. 3) [25]. When developing medical mobile applications, we focus on two main types of users — the physician and the patient. They differ one from other in their possibilities and restrictions on access to certain information. Applications can be used in full or partial mode.

Methods and means of IIT based on the use of mobile devices provide increased efficiency of medical care to the population by preventing chronic disease, increasing the duration of remission, reducing the recurrence of the disease. When using such IT for medical care to patients, there is also a decrease in the cost of treating and rehabilitating patients, increasing the efficiency of storing and transmitting medical data with accelerating the exchange of digital medical information.



**Fig. 3.** Interconnection of mobile applications targeting a physician and patient



## **THE DIGITAL MEDICINE GLOBALIZATION**

This is the stage of the future development of digital interstate medicine. Telemedicine and the use of mobile applications are only two facets of this process. It is necessary to create global knowledge bases that include detailed information not only about standard pathological cases, but also about deviations in the course of pathological processes and the corresponding medical means, about risk groups etc. As any interstate process, globalization of digital medicine requires serious analysis and development of legal foundations taking into account the principles of insurance medicine in different countries.

But we should not forget the ambiguous moments of the DM spread. The indisputable relevance and significance of DM induces a proposals flurry from the fields of engineering and technology, much of which are “quickly baked”, not based on the principles of evidence-based medicine, and on a rigorous analysis of the preliminary studies results. There are cases of development of automated decision support systems by physicians, in which the physician is practically excluded from the technological chain. One of the mostly developing areas of DM is the creation of a variety of sensors to collect information about the patient's state. But only a part of these proposals was accepted by physicians for practical use.

Thus, the digital transformation in medicine, like any new process, undergoes the stages of gradual complication of tasks, methods and means for their implementation: from formalization of primary medical information to improving methods for its analysis, transmission and storage to improve the quality of medical care for patients any time and at any point of the world.

## **CONCLUSION**

The developed model of digital transformation in medicine includes such components: Object, Operational processes and Business models of the treatment and diagnostic processes, for which functions and tasks are selected taking into account the specifics of the subject area according to object and quality of the analyzed information.

There are several main stages in the digital medicine development: I — digital transformation of primary medical information; II — development of support systems for the diagnostic and treatment process; III — development of technologies and systems for supporting the physician's activities with digital information; IV — mobile medicine; V — the digital medicine globalization. The beginning of the digital transformation of primary medical information laid the formation of methodological foundations for the creation of formalized medical records and standardized documents.

The proposed method for determining markers of functional status of the CVS, based on mathematical models of forecasting and classification using Data Mining, allows to determine the boundary values of these predictors by the identified ECG predictors of the CVS functional status (estimated vegetative regulation, myocardial state and its reserves) for different groups of patients, as well as to define different functional classes.

The development at the stage of IT support for a physician's activity with digital medical data ensures the implementation of such functions of digital

transformation model in medicine: the acquisition of knowledge of the diagnostic and treatment processes, enhancement of the specialist's possibilities, management of medical institutions. These functions are carried out both at the level of a medical institution and at the interregional level using international standards of presentation and transmission digital medical data.

The basic structure of any mobile application consists of a kernel (platform based on Android, IOS or Windows Mobile) and functional blocks that are formed taking into account the specific tasks of this mobile application. The development of medical mobile applications is focused on at least two main types of users — the physician and the patient, mobile applications for them are distinguished by a set of opportunities and restrictions on access to certain information.

Medicine is already faced with the squall of information, which is being formed through the use of new IT sources: large functional diagnostics complexes, digital clinical laboratories, mobile data sensors of patients' health in real time regime and others. This necessitates the creation of large information networks using cloud technologies for storing information and intelligent information technologies to provide the necessary level for analysing this huge amount of information and supporting decision-making by the physicians at all the stages of the diagnostic and treatment processes.

#### REFERENCES

1. About the conceptualization of the concept of the development of the digital economy of Ukraine and 2018–2020 on the basis of the plan set for the project: Disposition of the Government of Ukraine. URL: <http://www.me.gov.ua/Documents/> (Last accessed: 06.07.18) (in Ukrainian).
2. The Nine Elements of Digital Transformation. URL: [https://sloanreview.mit.edu/article/the-nine-elements-of-digital-transformation/?social\\_token=d65abc6db70ba459408562abb8de32bc&utm\\_source=facebook&utm\\_medium=social&mmmmmt](https://sloanreview.mit.edu/article/the-nine-elements-of-digital-transformation/?social_token=d65abc6db70ba459408562abb8de32bc&utm_source=facebook&utm_medium=social&mmmmmt) (Last accessed: 27.06.18)
3. Medical information system. Kyiv: Nauk. Dumka, 1975. 508 p. (in Russian).
4. A. p. № 2002032456 Ukraine MKI. Method for the diagnosis of local changes in the myocardium state. V.A. Petrukhin, V.N. Mamaev, A.S. Kovalenko, T.V. Petrukhina, V.A. Shumakov. Announced 15.01.2003; publ. 03.28.2003. (in Russian).
5. Provotar A.I., Vasilik P.V. Model waves and interaction: Theoretical and applied aspects. Kyiv: Nauk. Dumka, 2014. 296 p (in Russian).
6. Vasilik P.V., Lychak M.M. Possible interactions in the Solar System and the synchronism of cyclical variations in solar activity with climatic changes on Earth. *Geophysical journal*. 2012. V. 34, No. 1. P. 138–158. (in Russian).
7. Vasilik P.V., Vasilega A.G., Chekaylo M.A. Influence of disturbances of space environmental factors on the accident rate of the objects of ground infrastructure and the accident rate on transport. *Kibernetika i vyčislitel'naâ tehnika*, 2011, Issue 166. P. 74–84 (in Russian).
8. Kozak L.M., Lukashenko M.V. The use of information models and integral assessments of the functional state of students for the formation of programs of psychological support. *Integrative anthropology*. 2008. №2 (12). P. 51–57 (in Russian).
9. Kozak L.M., Lukashenko M.V. Monitoring and correction students' functional state. *Kibernetika i vyčislitel'naâ tehnika*. 2014. Issue 176. P. 74–84.
10. M.L. Kochina, L.M. Kozak, A.S. Yevtushenko Analysis of changes in the factor structures of indicators of the functional state of a person with different types of visual load. *Bulletin of problems of biology and medicine*. 2013, Iss. 1, Vol. 1 (98), pp. 41–45 (in Russian).
11. Evtushenko A.S., Kozak L.M., Kochina M.L. Evaluation of the relationship structure between the functional indicators of operators in visual work using factor models. *Kibernetika i vyčislitel'naâ tehnika*. 2016. Vol. 185. P. 60–76 (in Russian).
12. Rogozinskaya N.S., Kozak L.M. Information support of technology for automated monitoring of the health of the population. *Kibernetika i Sistemnyj Analiz*. 2013. № 6. P. 162–173 (in Russian).

13. Rogozinskaya N.S., Kozak L.M. Complex indicators for the analysis of causal mortality of the population. *Clinical informatics and telemedicine*. 2013. Vol. 9, Iss. 10. P. 108–116 (in Russian).
14. Rogozinskaya N.S., Kozak L.M. Information technology research of the state of health of the population of the region. *Upravlâushie sistemy i mašiny*. 2013. № 6. P. 59–67 (in Russian).
15. Krivova O.A., Kozak L.M. Comprehensive assessment of regional demographic development. *Kibernetika i vyčislitel'naâ tehnika*. Issue 182. 2015. P. 70–84 (in Russian).
16. Krivova, O.A., Tchaikovsky, I.A., Kalnish, V.V., Kozak, L.M. Vidbir informative shows the variability of the rhythm of the heart - the markers of the reaction to his stimulation. *Medical informatics and engineering*. 2016. No. 2. pp. 37–44 (in Russian).
17. Tchaikovsky I.A. The concept of multilateral analysis of the electrocardiogram using portable electrocardiographs as part of a preventive medical examination. *Preventive medicine*. 2014. No. 17 (2). P. 42–48 (in Russian).
18. Sposib Universalnoyi Balnoyi Otcinky EKG: Budnik M.M., Staryska G.A., Tchaikovsky I.A. Pat. 104827 Ukraine, IPC: A61B 5/0402, A61B 5/0205; declare 07.13.2015; publ. 02/25/2016, Bul. No. 4.
19. Pesenzali A.A., Kozak L.M. Pre-project analysis of the functional content of an integrated information system of a medical institution. *Kibernetika i vyčislitel'naâ tehnika*, 2011, Iss. 164. P. 63–71.
20. EN ISO 12052: 2011. Health informatics. Digital work, including workflow and data management URL: <http://iso.org>. (Last accessed: 23.01.18)
21. Romanyuk O. A., Kovalenko A.S., Kozak L.M. Information support interoperability of instrumental studies and long-term storage of digital medical imaging in health care system. *Kibernetika i vyčislitel'naâ tehnika*. 2016. Iss. 184. P. 56–71 (in Russian).
22. Kovalenko A.S., Kozak L.M., Romanyuk O.A. Information technology of digital medicine. *Kibernetika i vyčislitel'naâ tehnika*. 2017. №1(187). P.67–79. (in Russian).
23. Kovalenko A.S., Kozak L.M., Ostashko V.G. Telemedicine — the development of a single medical information space. *Upravlâushie sistemy i mašiny*. 2005. № 3. P. 86–92 (in Russian).
24. Gritsenko V.I., Kozak L.M., Kovalenko A.S., Pezenzali A.A., Rogozinskaya N.S., Ostashko V.G. Medical information systems as elements of a unified medical information space. *Kibernetika i vyčislitel'naâ tehnika*, 2013, Iss. 174. P. 30–46 (in Russian).
25. Kovalenko O.S., Kozak L.M., Romaniuk O.O., Maresova T.A., Nenasheva L.V., Fyniak G.I. Mobile applications in the structure of modern medical information systems. *Upravlâushie sistemy i mašiny*, 2018, №4. P. 57–69.

Received 29.08.2018

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Про схвалення Концепції розвитку цифрової економіки та суспільства України на 2018–2020 роки та затвердження плану заходів щодо її реалізації: Розпорядження Кабінету Міністрів України. URL: <http://www.me.gov.ua/Documents/> (дата обращения: 06.07.18)
2. The Nine Elements of Digital Transformation URL: [https://sloanreview.mit.edu/article/the-nine-elements-of-digital-transformation/?social\\_token=d65abc6db70ba459408562abb8de32bc&utm\\_source=facebook&utm\\_medium=social&utm\\_campaign=sm-direct](https://sloanreview.mit.edu/article/the-nine-elements-of-digital-transformation/?social_token=d65abc6db70ba459408562abb8de32bc&utm_source=facebook&utm_medium=social&utm_campaign=sm-direct) (дата обращения: 27.06.18)
3. Медицинская информационная система. К.: Наук. думка, 1975. 508 с.
4. А.с. № 2002032456 Украина МКИ. Способ диагностики локальных изменений состояния миокарда / В.А. Петрухин, В.Н. Мамаев, А.С. Коваленко, Т.В. Петрухина, В.А. Шумаков; заявл. 15.01.2003; опубл. 28.03.2003. Бюл. № 1.
5. Провотар А.И., Василик П.В. Модельные волны и взаимодействие: Теоретические и прикладные аспекты. Київ: Наук. Думка, 2014. 296 с.
6. Василик П.В., Лычак М.М. Возможные взаимодействия в Солнечной системе и синхронность циклических вариаций активности Солнца с климатическими изменениями на Земле. Геофизический журнал. 2012. Т. 34, № 1. С. 138–158.

7. Василик П.В., Василега А.Г., Чекайло М.А. Влияние возмущений космических факторов среды на аварийность объектов наземной инфраструктуры и аварийность на транспорте. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2011. Вып. 166. С. 74–84.
8. Козак Л.М., Лукашенко М.В. Использование информационных моделей и интегральных оценок функционального состояния учащихся для формирования программ психологического сопровождения. *Інтегративна антропологія*. 2008. №2 (12) С. 51–57.
9. Kozak L.M., Lukashenko M.V. Monitoring and correction students' functional state by the information technology tools. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2014. Вып. 176. С. 74–84.
10. М.Л.Кочина, Л.М. Козак, А.С.Евтушенко Анализ изменения факторных структур показателей функционального состояния человека при разных видах зрительной загрузки. *Вестник проблем биологии и медицины*. 2013. Вып. 1, Том 1(98), С.41–45.
11. Евтушенко А.С., Козак Л.М., Кочина М.Л. Оценка структуры связей между функциональными показателями операторов при зрительном труде с использованием факторных моделей. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2016. Вып. 185. С. 60–76.
12. Rogozinskaya N.S., Kozak L.M. Информационное обеспечение технологии автоматизированного мониторинга состояния здоровья населения. *Кибернетика и системный анализ*. 2013. № 6. С. 162–173.
13. Rogozinskaya N.S., Kozak L.M. Комплексные индикаторы для анализа причинной смертности населения. *Клиническая информатика и телемедицина*. 2013. Том 9. Вып. 10. С. 108–116.
14. Rogozinskaya N.S., Kozak L.M. Информационная технология исследования состояния здоровья населения региона. *Управляющие системы и машины*. 2013. № 6. С. 59–67.
15. Кривова О.А., Козак Л.М. Комплексная оценка регионального демографического развития. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2015. Вып. 182, С. 70–84.
16. Чайковский И.А. Концепция многостороннего анализа электрокардиограммы с помощью портативных электрокардиографов как составной части профилактического медицинского осмотра. *Профилактическая медицина*. 2014. № 17(2). С. 42–48.
17. Кривова О.А., Чайковский И.А., Кальниш В.В., Козак Л.М. Відбір інформативних показників варіабельності ритму серця — маркерів реакції на емоційні стимули. *Медицина інформатика та інженерія*. 2016. №. 2. С. 37–44.
18. Пат. 104827 Україна, МПК: Спосіб універсальної бальної оцінки ЕКГ// Будник М.М., Старинська Г.А., Чайковский І.А. А61В 5/0402, А61В 5/0205; заявл. 13.07.2015; опубл. 25.02.2016, Бюл. № 4.
19. Пезенцали А.А., Козак Л.М. Предпроектный анализ функционального наполнения комплексной информационной системы лечебно-профилактического учреждения. *Кибернетика и вычислительная техника*, 2011, вып 164. С. 63–71.
20. EN ISO 12052:2011. Health informatics. Digital imaging and communication in medicine (DICOM) including workflow and data management URL: <http://iso.org>. (дата обращения: 23.01.18)
21. Романюк О.А., Коваленко А.С., Козак Л.М. Информационное обеспечение взаимодействия систем инструментального исследования и системы длительного хранения цифровых медицинских изображений в учреждениях здравоохранения. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2016. Вып. 184. С. 56–72.
22. Коваленко А.С., Козак Л.М., Романюк О.А. Информационные технологии цифровой медицины. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2017. №1(187). С.67–79.
23. Коваленко А.С., Козак Л.М., Осташко В.Г. Телемедицина — развитие единого медицинского информационного пространства. *Управляющие системы и машины*. 2005. №3. С. 86–92.
24. Гриценко В.И., Козак Л.М., Коваленко А.С., Пезенцали А.А., Rogozinskaya N.S., Осташко В.Г. Медицинские информационные системы как элементы единого медицинского информационного пространства. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2013. Вып. 174. С. 30–46.
25. Коваленко О.С., Козак Л.М., Романюк О.О., Маресова Т.А., Ненашева Л.В., Финяк Г.І. Мобільні застосунки у структурі сучасних медичних інформаційних систем. *Управляющие системы и машины*. 2018. №4. С. 57–69.

Отримано 29.08.2018

Козак Л.М., д-р біол. наук, старш. наук. співроб.,  
пров. наук. співроб. відд. медичних інформаційних систем  
e-mail: lmkozak52@gmail.com

Коваленко О.С., д-р мед. наук, проф.,  
зав. відд. медичних інформаційних систем  
e-mail: askov49@gmail.com

Кривова О.А., наук. співроб.  
відд. медичних інформаційних систем  
e-mail: ol.kryvova@gmail.com

Романюк О.О., молодш. наук. співроб.  
відд. медичних інформаційних систем  
e-mail: ksnksn7@gmail.com

Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій  
та систем НАН України та МОН України,  
пр. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна

## **ЦИФРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ В МЕДИЦИНІ: ВІД ФОРМАЛІЗОВАНИХ МЕДИЧНИХ ДОКУМЕНТІВ ДО ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЦИФРОВОЇ МЕДИЦИНИ**

**Вступ.** Відповідно до Концепції розвитку цифрової економіки і суспільства України на 2018-2020, прийнятої у січні 2018 року, серед ключових складників «цифровізації» є розвиток цифрової інфраструктури — широкопasmовий Інтернет по всій території України, і стимулювання цифрових перетворень у різних галузях економіки і суспільства, зокрема у медицині.

**Метою** статті є аналіз етапів цифрової трансформації в медицині і розробок авторів і їхніх колег відділу медичних інформаційних систем з розвитку інформаційних технологій цифрової медицини.

**Результати.** Надано сформовану модель цифрової трансформації в медицині та виділено декілька основних етапів розвитку цифрової медицини: I — цифрова трансформація первинної медичної інформації; II — розроблення систем підтримки лікувально-діагностичного процесу; III — розроблення технологій і систем підтримки діяльності лікаря з цифровою інформацією; IV — мобільна медицина; V — глобалізація цифрової медицини.

Запропоновано метод визначення маркерів функціонального стану серцево-судинної системи, в основу якого покладено математичні моделі прогнозу та класифікації із застосуванням Data Mining, що дає змогу виявляти та визначати граничні значення ЕКГ предикторів функціонального стану серцево-судинної системи для різних груп пацієнтів. Відзначено інформаційну технологію підтримки процесів отримання, передачі та зберігання цифрових медичних зображень, яку спрямовано на забезпечення ефективної роботи лікаря з цифровою інформацією з різних джерел: комплекси функціональної діагностики, сховища цифрових медичних даних і зображень з використанням PACS і хмарних технологій. Застосування в роботі Центру телемедицини запропонованої теорії телемедичних систем, яка включає сформульовані принципи організації цих систем, критерії та методи аналізу цифрових медичних даних, дало можливість охопити кваліфікованого медичною допомогою населення більше 20-ти областей України.

**Висновки.** Розвиток цифрової трансформації у медицині проходить стадії з поступовим ускладненням завдань, методів і засобів їх реалізації: від формалізації первинної медичної інформації до удосконалення методів її аналізу, передачі і зберігання для підвищення якості медичної допомоги пацієнтам в будь-який час та у будь-якій точці країн світу.

**Ключові слова:** цифрова трансформація у медицині, формалізовані медичні записи, інформаційні технології оцінювання стану людини та фізіологічних систем організму, телемедицина, мобільні застосунки.

*Козак Л.М.*, д-р биол. наук, старш. науч. сотр., вед. науч. сотр.

отд. медицинских информационных систем

e-mail: lmkozak52@gmail.com

*Коваленко А.С.*, д-р мед. наук, проф.,

зав. отд. медицинских информационных систем

e-mail: askov49@gmail.com

*Кривова О.А.*, науч. сотр.

отд. медицинских информационных систем

e-mail: ol.kryvova@gmail.com

*Романюк А.А.*, младш. науч. сотр. отд. медицинских информационных систем

e-mail: ksnksn7@gmail.com

Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем

НАН Украины и МОН Украины, пр. Акад. Глушкова, 40,

м. Киев, 03187, Украина

## ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ В МЕДИЦИНЕ: ОТ ФОРМАЛИЗОВАННЫХ МЕДИЦИНСКИХ ДОКУМЕНТОВ К ИНФОРМАЦИОННЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ ЦИФРОВОЙ МЕДИЦИНЫ

Проанализированы этапы цифровой трансформации в медицине: I — цифровая трансформация первичной медицинской информации; II — разработка систем поддержки лечебно-диагностического процесса; III — разработка технологий и систем поддержки деятельности врача с цифровой информацией; IV — мобильная медицина; V — глобализация цифровой медицины. Показан вклад разработок авторов и их коллег (отдел медицинских информационных систем) по развитию информационных технологий цифровой медицины на этих этапах. Представлены разработанные: метод определения маркеров функционального состояния ССС; ИТ поддержки процессов получения, передачи и хранения цифровых медицинских изображений; теория телемедицинских систем и результаты ее применения; базовая структура мобильного медицинского приложения и взаимодействие ее функциональных блоков с выделением задач и ограничений действий основных пользователей — врача и пациента.

**Ключевые слова:** цифровая трансформация в медицине, формализованные медицинские записи, Data Mining, информационные технологии оценки состояния человека и физиологических систем организма, телемедицина, мобильные приложения.

---

DOI: [https:// 10.15407/kvt194.04.079](https://10.15407/kvt194.04.079)

УДК 615.47: 004.9

**BOBK M.I.**, канд. біол. наук, старш. наук. співроб.,  
зав. відд. біоелектричного керування та медичної кібернетики  
e-mail: [vovk@irtc.org.ua](mailto:vovk@irtc.org.ua); [invovk3940@gmail.com](mailto:invovk3940@gmail.com)  
Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій  
та систем НАН України та МОН України,  
пр. Акад. Глушкова 40, м. Київ, 03187, Україна

## **ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ КЕРУВАННЯ РУХАМИ. ЕВОЛЮЦІЯ СИНТЕЗУ І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ**

---

Еволюцію синтезу технологій біоелектричного керування рухами людини подано в аналізі декількох поколінь програмних міоелектростимуляторів типу «МІОТОН», «МІОСТИМУЛ» і нового класу апаратів цифрової медицини ТРЕНАР®. Особливістю цих апаратів є використання спеціально оброблених електроміографічних (ЕМГ) сигналів у якості програм керування сигналами електростимуляції і зворотного зв'язку. Розглянуто принципи, критерії, методи, програми, на базі яких синтезовано інноваційну технологію персонального тренування/відновлення рухів ТРЕНАР®. Представлено комп'ютерний програмно-апаратний комплекс «ПРОМОВА-1», який реалізує нову технологію персонального відновлення усного мовлення у хворих після інсульту на базі оригінальних методик тренувань тонкої моторики кисті. Перспективні дослідження спрямовано на синтез технологій мобільної інформаційно-консультаційної допомоги лікарю у діагностиці дефіциту рухових і мовленнєвих функцій і формуванні індивідуальних планів реабілітації, на синтез технологій керування узгодженою активністю м'язів під час виконання координованих рухів та відновного лікування дефектів постави.

**Ключові слова:** біоелектричне керування, рухи, мовлення, координація, поставка, персональна реабілітація, методи, програми, міоелектростимуляція, цифрова медицина.

### **ВСТУП**

Становлення і розвиток досліджень з керування рухами визначалося не тільки науковим інтересом, але й практичною необхідністю. Рухова активність є винятково важливим, фундаментальним чинником формування, збереження, зміцнення здоров'я та гармонічного розвитку людини, особливо в дитячому, підлітковому та юнацькому віці. Рухи є найдоступнішими та найефективнішими ліками, найкращим засобом для відновлення здоров'я. Цереброваскулярна патологія та її найважча форма — інсульт, є однією з найчастіших причин втрати рухових функцій. Спостерігається стрімка тенденція до збільшення кількості хворих на інсульт, а також до їх «омо-

лодження». Інсульт — провідна причина інвалідності дорослого населення. За даними ВООЗ 30 % хворих становлять особи працездатного віку (до 50-60 років). Дитячий церебральний параліч (ДЦП) залишається провідною причиною інвалідності серед дітей. Порушення мовлення спостерігаються більш ніж у третини хворих, які перенесли інсульт, та є другим за значимістю і поширеністю постінсультним дефектом після рухових порушень. Розроблення ефективних методів і засобів відновлення рухових і мовленнєвих функцій не перестає бути актуальним.

Дослідження, спрямовані на керування рухами людини, зародилися ще в стінах Обчислювального Центру АН УРСР у відділі біологічної кібернетики (зав. відділом — академік М.М. Амосов). Тут поряд з іншими стояло завдання розробити теорію керування основними функціями і органами живих організмів на основі біоелектростимуляції. В рамках цього завдання сформувався напрям — біоелектричне керування руховими функціями, керування, яке використовує в якості команд оброблені електроміографічні (ЕМГ) сигнали. З 1964 р. цей напрям отримав цілеспрямований розвиток в Інституті кібернетики АН України, в лабораторії «Керування руховими реакціями живих організмів», з 1969 р. — у відділі «Біоелектричне керування і медична кібернетика». З травня 1997 р. продовжує плідно розвиватися в Міжнародному центрі інформаційних технологій та систем НАН України і МОН України у згаданому відділі. З 1964 по 2009 р.р. на чолі досліджень стояв доктор медичних наук, професор Леонід Седекович Алєєв, лауреат Премії імені М.М. Амосова (2004 р.).

Наукові дослідження цього напрямку характеризуються як теоретичними, так і прикладними результатами — від ідеї, розроблення концептуальних основ, фізіологічних передумов, методів, формулювання принципів, розроблення алгоритмів, інформаційно-структурних і структурно-функціональних моделей біотехнічних систем керування рухами людини до технічної реалізації кількох поколінь електронних апаратів керування рухами, передачі їх в серійне виробництво і практичне використання. Такі апарати призначено для: відновного лікування залишкових явищ уражень центральної та периферичної нервової системи у дорослих і дітей (наприклад, постінсультні паралічі і парези, неврити різного характеру), травм опорно-рухового апарату; керування рухами, їхньої корекції або навчання певним руховим навичкам (наприклад, у спорті); попередження несприятливого впливу обмежень рухової активності, корекції наслідків перебування людини в спеціальних умовах (наприклад, у невагомості); керування функціями, тісно пов'язаними з руховими (наприклад мовними) тощо.

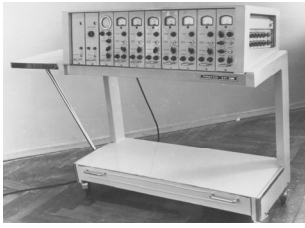
**Мета статті** — розглянути теоретичні та технологічні основи еволюції синтезу біотехнічних систем керування рухами, показати роль нових інформаційних технологій і засобів цифрової медицини в синтезі систем персонального керування рухами для відновлення порушених патологією рухових і мовленнєвих функцій.



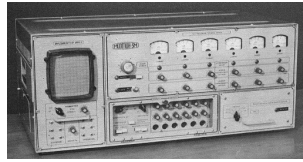
## **БАГАТОКАНАЛЬНІ ПРИСТОЇ БІОЕЛЕКТРИЧНОГО КЕРУВАННЯ РУХАМИ ЛЮДИНИ ТИПУ «МІОТОН»**

З кінця 50-х — початку 60-х років ХХ століття для відновлення рухових функцій у паралізованих хворих стали активно використовувати електростимуляцію як спосіб примусового скорочення м'язів, внаслідок якого до неушкоджених ділянок мозку по каналах зворотного зв'язку надходить необхідна для відновлення рухів аферентна інформація про скорочення м'язів. Традиційні методи стимуляції за допомоги генераторів електричних імпульсів з фіксованими параметрами, зміна яких в допустимих для даного стимулятора межах проводиться оператором, далеко не завжди задовольняли завдання реабілітації хворих з порушеннями рухів. Щоб відновити не тільки силу уражених м'язів, а й втрачену рухову навичку, виникла необхідність в багатоканальних електростимуляторах, які використовують певні програми (моделі) залучення м'язів до руху, що відпрацьовується. Важливим етапом у розвитку програмної міоелектростимуляції був перехід до використання в якості програми (моделі активації м'язів, які втягуються в рух) оброблених ЕМГ сигналів здорових довільних рухів. Такий спосіб керування знайшов використання в пристроях типу «Міотон» [1–3]. У 1965 р. в Інституті кібернетики АН УРСР виготовлено перший експериментальний зразок багатоканального пристрою біоелектричного керування рухами людини «Міотон», який реалізує цей метод. У 1967–1970 рр. виготовлено дослідні зразки шестиканального апарата «Міотон-2» (рис. 1а), який включено в номенклатуру дозволених для застосування в медичній практиці і серійного виробництва виробів медичної техніки (Реєстраційне посвідчення № 77/29/13 від 4.02.1977 р.). Використання оброблених ЕМГ сигналів здорових довільних рухів в якості програм вже на цьому етапі було пов'язане з поняттям «біоелектричного образу руху» як моделі (програми) формування примусових м'язових скорочень під впливом програмної міоелектростимуляції [3].

Результатом модернізації апарата «Міотон-2» було розроблення і виробництво на Арзамаському приладобудівному заводі (АПЗ) апарата «Міотон-3М», 1983 г. (рис. 1 б). Особливістю «Міотон-3М» було формування сигналу електроміостимуляції з рівня, який відповідає порогу збудження м'язів. Це збільшувало відповідність нав'язаного руху програмі (моделі) [4]. До складу «Міотон-3М» входив шестиканальний магнітний реєстратор, що дозволяло формувати «банк рухових програм» здорових м'язів іншої людини, а також шестиканальний індикатор для візуального контролю рухових програм і порівняння їх з виконуваними рухами. У 1988 р. «Міотон-3М» демонструвався на Лейпцігському ярмарку, був нагороджений Золотою медаллю. На базі апарата «Міотон-3М» з 1989 р. на АПЗ розпочався серійний випуск апарата «Міотон-604» з поліпшеними технічними характеристиками і сервісними функціями (рис. 1 в). Апарати «Міотон» знайшли широке використання в клініках і курортах колишнього Радянського Союзу для відновлення рухових функцій, пошкоджених патологією центральної і периферичної нервової системи [3].



а)



б)



в)

**Рис. 1.** Апарати біоелектричного керування рухами людини типу «Міотон»

Завдяки співробітництву з НПКФ «Біокор-інформатика» при Інституті кібернетики імені В.М. Глушкова АН УРСР було розроблено, поставлено на виробництво та знайшло використання в медичних установах України шести-канальний програмний біоелектричний стимулятор «Міокор-МК-01», 1991 р. Особливість апарата у порівнянні з апаратами типу «Міотон» — наявність банку штучно синтезованих програм керування, які враховують найхарактерніші залучення м'язів у виконання різних рухів.

### **БАГАТОКАНАЛЬНІ ПРИСТОЇ АДАПТИВНОГО БІОЕЛЕКТРИЧНОГО КЕРУВАННЯ РУХАМИ ЛЮДИНИ «МІОСТИМУЛ»**

Введення зворотних зв'язків в електронні системи керування рухами дозволило перейти до нового класу апаратів, які реалізують принципи адаптивного керування. Адаптивний підхід є корисним в умовах великої початкової невизначеності, коли брак апріорної інформації про об'єкт керування потрібно заповнити поточною інформацією, а також у системах керування об'єктами з характеристиками, які дрейфують. Обидві ситуації мають місце у керуванні рухами на основі зовнішніх контурів. Так, параметри м'язової активності ідентичних м'язів різних людей і м'язів однієї людини мають суттєвий розкид; параметри м'язової активності істотно відрізняються за умови патології і зазнають змін в процесі електростимуляції. Адаптивне керування передбачає автоматичне підлаштування параметрів сигналу стимулювання під функціональний стан м'язів, що стимулюються.

В технології синтезу зворотних зв'язків використано результати експериментальних досліджень з динаміки амплітудних і частотних характеристик м'язової активності (порог збудження, м'язова сила, обсяг рухів) під час тренувальних процедур, а також результати аналізу змін ЕМГ сигналу (амплітуда, частота) у разі втоми. Під час реабілітації рухових функцій не слід виходити за межі максимальних подразнень, оскільки за великих рівнів стимулу в роботу включаються захисні реакції організму, які можуть спотворити бажану штучно викликану аферентацію для формування нового динамічного стереотипу. Звідси виникає необхідність в автоматичному регулюванні динамічного діапазону стимулу залежно від функціонального стану м'язів, які стимулюються. Принципи адаптивного керування реалізовано в апараті «Міостимул». Промислові зразки у кількості двох випущені підприємством «Октава», завод «Генератор», (м.Київ) у 1975 і 1977 рр.

Цей шестиканальний апарат «Міостимул» містить два види зворотних зв'язків: перший для автоматичного регулювання динамічного діапазону сигналу стимуляції [5], другий — для зменшення рівня сигналу стимуляції або її відключення, коли настає стомлення м'язів, які стимулюються [6]. Як сигнал зворотного зв'язку, використовують поріг збудження та інформативні параметри ЕМГ сигналу м'язів (амплітуда, частота), що залучаються у рухи, якими керують — «викликану електроміограму». Технологія адаптивного керування захищена патентами США, Англії, Німеччини Франції, Канади, Швеції, Італії, Югославії ([7]).

## **РЕЗУЛЬТАТИ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.**

### **ЕЛЕКТРОННІ АПАРАТИ ПЕРСОНАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ РУХАМИ «ТРЕНАР».**

**Організація індивідуального підходу до керування рухами на базі зовнішніх контурів.** Індивідуальний підхід до лікування є одним з провідних напрямів у сучасній системі охорони здоров'я. Реабілітація — це перш за все мобілізація резервів організму на відновлення функції, порушеної внаслідок патології. Використання сучасних інформаційних технологій створює нові можливості у виборі індивідуального «маршруту» лікування. У разі відновлення рухових функцій мобілізація резервів передбачає розроблення і реалізацію індивідуальних комплексних програм медичної реабілітації, в яких поряд з лікарськими засобами провідне місце займають технології індивідуального тренування/керування рухами на базі зовнішніх контурів. Такі зовнішні контури виконують роль відсутньої ланки у формуванні або корегуванні гомеостазу рухової системи та забезпечують функції сприйняття, передачі знань про рух, формування, регулювання і контролювання рухів [8–10].

**Принципи та критерії індивідуальної активації резервів організму на відновлення рухів.** Поняття гомеостазу рухової системи, його індивідуальності та індивідуальності порушення за рухової патології приводять до розуміння доцільності дотримуватися *принципу біологічної адекватності як головного у керуванні рухами за допомоги зовнішніх контурів на різних етапах реабілітації*. У зв'язку з цим дуже важливим є вибір керувальних впливів на кожному етапі відновлення рухових функцій. Керувальні впливи повинні бути такими, які запускають і стимулюють резерви внутрішніх систем регулювання за рахунок комбінованої роботи внутрішніх механізмів і керувальних впливів, а коли внутрішніх резервів недостатньо, то за рахунок роботи тільки керувальних впливів. Тому зовнішній контур повинен мати функціональні й технічні характеристики, які даватимуть змогу оптимізувати «маршрут» лікування (відновлення рухових функцій) як багатокритеріальну оптимізацію процесу формування рухів на основі активації резервів пацієнта, адекватної стану його рухових функцій, на різних етапах реабілітації. Засобом, який забезпечує *біологічно адекватний запуск і стимуляцію резервів організму на відновлення рухів, є метод, програма, методики, регламент зовнішнього впливу*, які відповідають стану рухових функцій пацієнта та його загальному стану. Перелічені вимоги до синтезу зовнішніх контурів керування дозволили сформулювати принципи організації індивідуального підходу до біологічно адекватного запуску і стимуляції резервів організму на відновлення рухів та розробити критерії, які забезпечують виконання цих принципів (рис. 2).

***Методи та індивідуальні програми активації резервів організму на відновлення рухових функцій за технологією ТРЕНАР®***

Індивідуальний підхід до реабілітації забезпечується набором базових програмно-технологічних електронних модулів, основу синтезу яких складають *різні методи та програми тренування примусових і довільних скорочень м'язів*. Цей підхід є основою синтезу біоінформаційної технології відновлення рухових і мовленнєвих функцій ТРЕНАР®. Технологію реалізує новий клас електронних виробів цифрової медицини — апаратно-програмний комплекс «ТРЕНАР» [11]: «Апарат для електростимуляції з біокеруванням Тренар-01» і «Апарат для електростимуляції з біологічним зворотним зв'язком Тренар-02» (Рис. 3).

Набір базових програмно-технологічних електронних модулів комплексу «ТРЕНАР» складає:

*Програмно-технологічний модуль «Синтез».* Метод — програмна електростимуляція; програма — «Синтез»; завдання — тренування примусових рухів під впливом електростимуляції м'язів за штучно синтезованими програмами у широкому діапазоні «посилання – пауза» імпульсів електростимуляції. Цей метод і програми тренувань надають можливість здійснювати активацію резервів нервової системи на відновлення рухів на базі аферентної пропріоцепції (рис. 4). Модуль застосовується на ранніх етапах реабілітації, у тому числі майже за відсутності рухів ураженої кінцівки.

*Програмно-технологічний модуль «Донор».* Метод — програмна електростимуляція; програма — «Донор»; завдання — тренування примусових рухів ураженої кінцівки під впливом електростимуляції відповідних м'язів за програмами, які «зчитуються» з власних здорових (бажано симетричних) м'язів пацієнта або м'язів іншої людини (інструктора) за умови їхнього довільного скорочення і передаються м'язам, які тренуються в режимі «онлайн». Пацієнт самостійно змінює програму тренування, здійснює контроль її виконання. Інформаційний потік, що йде в пошкоджену моторну зону кори головного мозку, складається з пропріоцептивних імпульсів як від довільних скорочень-розслаблень м'язів здорової кисті, так і від примусових скорочень-розслаблень м'язів пошкодженої кисті (рис. 5). Безпосередньо пацієнт або інструктор можуть контролювати і змінювати програму тренувань, ритм і силу скорочень м'язів, які тренуються. Зростає роль мотивації у процесі аферентного синтезу від довільних скорочень здорової кінцівки та примусових скорочень пошкодженої. Застосовується на ранніх етапах реабілітації за відсутності порушень когнітивної сфери.

*Програмно-технологічний модуль «Поріг».* Метод — порогова електростимуляція, програма – «Поріг»; завдання — тренування співвідношення довільно-примусових скорочень м'язів. Електростимуляція як спосіб примусового скорочення м'язів «запускається» у разі подолання пацієнтом певного порогу ЕМГ сигналу, який виникає за умови довільного скорочення тих самих м'язів, що тренуються. Рівень порогу встановлює оператор або самостійно пацієнт.

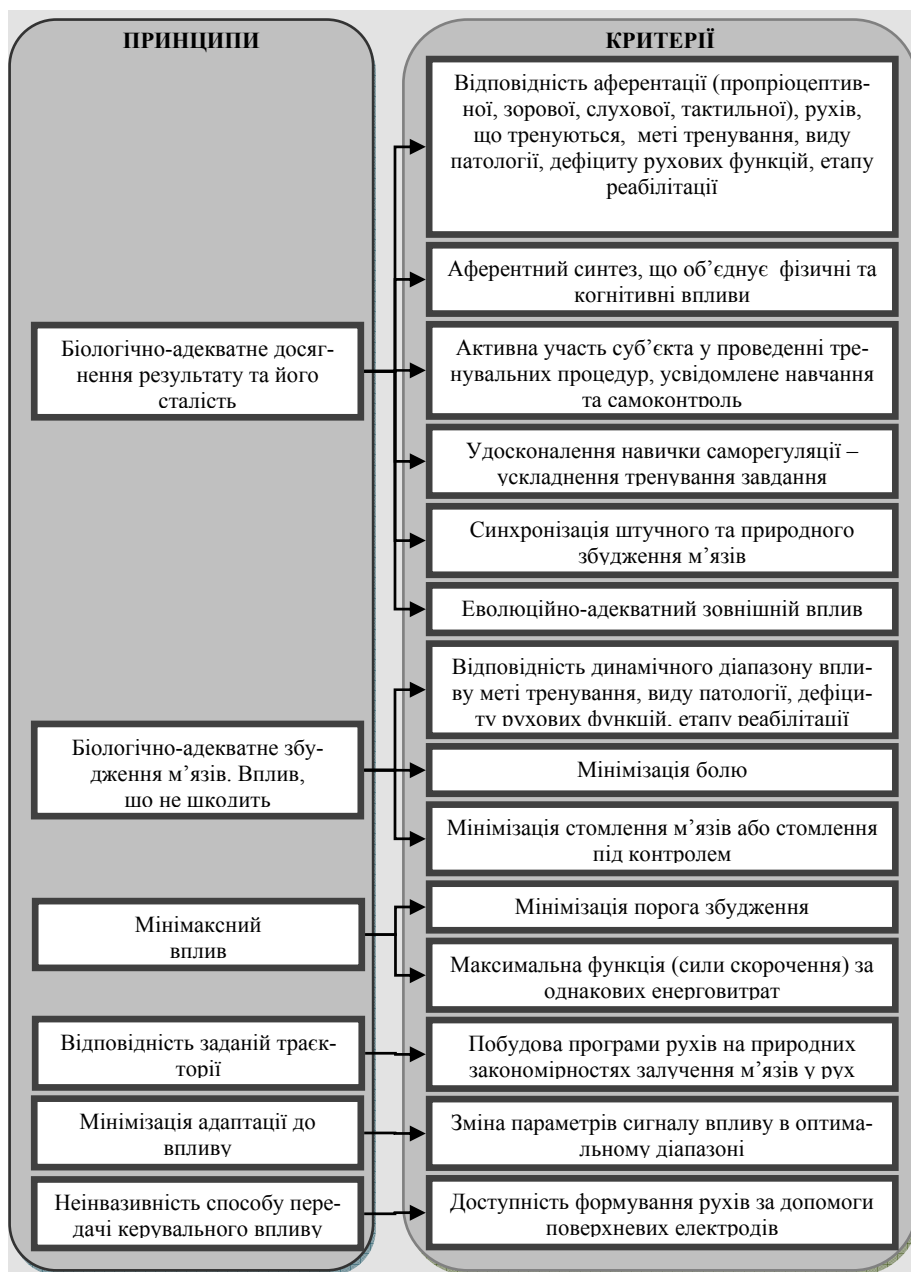


Рис. 2. Принципи та критерії індивідуального керування рухами



Рис. 3. Комплекс «ТРЕНАР»

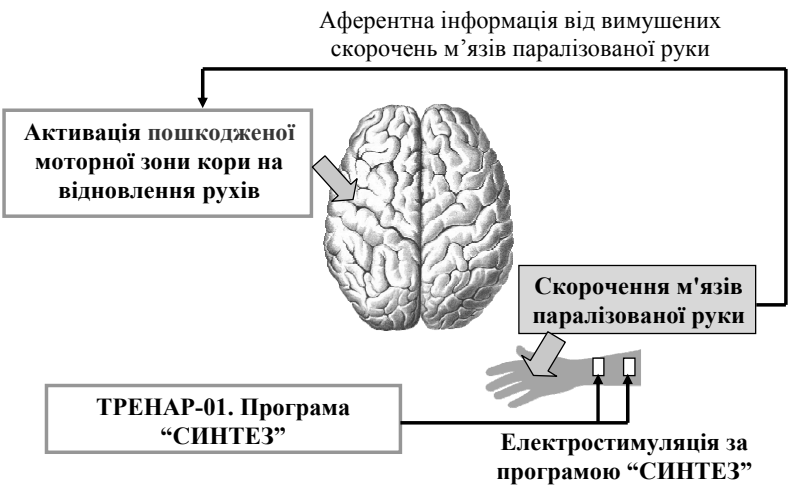


Рис. 4. Структурно-функціональна модель активації пошкодженої моторної зони кори на відновлення керування рухами за програмою «Синтез»



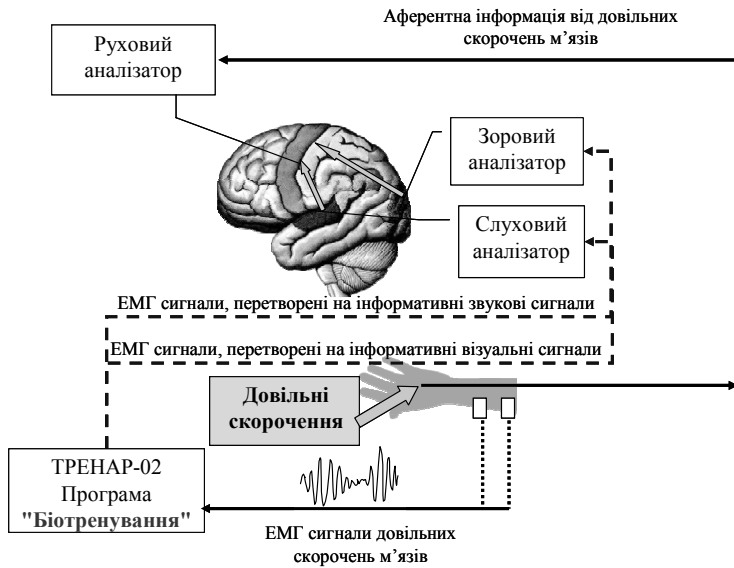
Рис. 5. Структурно-функціональна модель активації пошкодженої моторної зони кори на відновлення керування рухами за програмою «Донор»

Тренування спрямовано на те, щоб з кожним новим сеансом довільне скорочення м'язів долато все більший поріг ЕМГ сигналу, який виникає за умови довільного скорочення м'язів, що тренуються. Тим самим внесок довільного скорочення у тренувальне завдання поступово збільшується у порівнянні з примусовим скороченням. За методом «Порогова електростимуляція» ефективність впливу пропріоцептивної аферентації від примусових скорочень м'язів, що тренуються, на пошкоджену моторну зону кори зростає, тому що пошкоджена моторна зона стає «підготовленою» до керувальних впливів за рахунок аферентації від довільних скорочень м'язів пошкодженої кінцівки. Зростає і роль мотивації у процесі аферентного синтезу від довільних і примусових скорочень м'язів пошкодженої кінцівки. Ця програма, як і програма «Донор», надає можливість пацієнту самостійно ускладнювати тренувальне завдання. Метод «Порогова електростимуляція» застосовується у разі появи у пацієнта найменших ознак довільних рухів за відсутності порушень когнітивної сфери.

*Програмно-технологічний модуль «Пам'ять-Ауто».* Метод — програмна електростимуляція, програма — «Пам'ять-Ауто»; характеристика завдання — тренування довільних і примусових скорочень м'язів відбувається в режимі «запис – відтворення»: записаний у пам'яті ЕМГ сигнал довільного скорочення/розслаблення м'язів відтворюється у вигляді програми електростимуляції тих самих м'язів. Запис ЕМГ сигналу відбувається за умови подолання певного порогу. Тому мотивація у тренуванні м'язів за цією програмою хворої або здорової людини (наприклад, спортсмена) теж відіграє важливу роль.

*Програмно-технологічний модуль «Біотренування».* Метод — Біологічний зворотний зв'язок (БЗЗ), зоровий і слуховий за електроміограмою; програма — «Біотренування» (рис. 6). За цією програмою пацієнт тренує довільні скорочення м'язів відповідно до встановленого пацієнтом або інструктором (лікарем) тренувального завдання. ЕМГ сигнал м'яза, що тренується, перетворюється на візуальні та звукові інформаційні сигнали, які інформують пацієнта про успішність або неуспішність виконання тренувального завдання. Під час тренування довільних рухів за цією програмою ЕМГ сигнали, які характеризують м'язову активність довільних рухів, сприймаються пацієнтом у вигляді зорових і слухових образів. А інформаційний потік, що надходить в центральну нервову систему, є аферентним синтезом сигналів від пропріоцептивної, слухової, зорової сенсорних систем. Це забезпечує активацію додаткових механізмів до нейрональної перебудови пошкодженої моторної зони кори головного мозку. У разі використання методу біологічного зворотного зв'язку мотивація відіграє виняткову роль у процесі аферентного синтезу. Програму «Біотренування» за методом БЗЗ зазвичай використовують на останніх етапах реабілітації для наближення рухів пацієнта до норми. Важливим є те, що цю програму можна використовувати за наявності у пацієнта певних протипоказань до електростимуляції, наприклад кардіостимулятора.

Методологія, яка поєднує використання «електроміографічного образу» руху як програми керування (програмна електростимуляція за програмою «Донор») і формалізованого інформаційного образу руху, до якого повинен прагнути пацієнт, як цільової функції керування («Порогова електростимуляція, БЗЗ»), сприяє утворенню нових умовно рефлекторних комплексів під дією як *фізичних, так і когнітивних впливів*.



**Рис.6.** Структурно-функціональна модель активації пошкодженої моторної зони кори на відновлення керування рухами за програмою "Біотренування" (метод — БЗЗ)

### **Структурно-функціональна модель керування рухами на базі апаратів ТРЕНАР як зовнішніх контурів керування**

Як зовнішні контури керування рухами, апарати Тренар мають електричний та інформаційний зв'язок з м'язами, які керують, а також електричний та/або інформаційний зв'язок з м'язами, якими керують, залежно від програми тренування (рис. 7). Різноманітність програм формування/тренування рухів забезпечує вибір персональної програми, яка є адекватною функціональному стану рухової системи пацієнта, дозволяє індивідуально на кожному етапі реабілітації організувати процес тренування, що найбільш ефективно мобілізує резерви організму на відновлення рухів. Концепція гомеостазу рухової системи і принцип біологічної адекватності керувальних впливів на кожному етапі відновлення рухових функцій дозволили сформулювати головну вимогу до зовнішніх контурів керування: виконувати роль відсутньої ланки у формуванні гомеостазу рухової системи за тієї чи іншої патології рухової функції і, в кінцевому підсумку, бути засобом відновлення гомеостазу — стійкого виконання функції руху.

На базі оброблення та перетворення електроміографічних сигналів у зорові і слухові інформативні сигнали отримала розвиток теорія «образного усвідомлення» м'язової активності пацієнтом за допомоги зорового і слухового аналізаторів кори головного мозку. Внаслідок такого перетворення ЕМГ сигнали, що характеризують м'язову активність під час виконання рухів, які зазвичай недоступні свідомості, усвідомлюються пацієнтом у вигляді зорових і слухових інформативних образів. Це дозволяє активувати додаткові резерви моторної області кори на відновлення рухових функцій. Відомо, що моторна область як «центральный апарат побудови рухів» є кортикальним відділом пропріоцептивної сенсорної системи і одночасно місцем конвергенції проєкцій від усіх інших сенсорних зон кори.



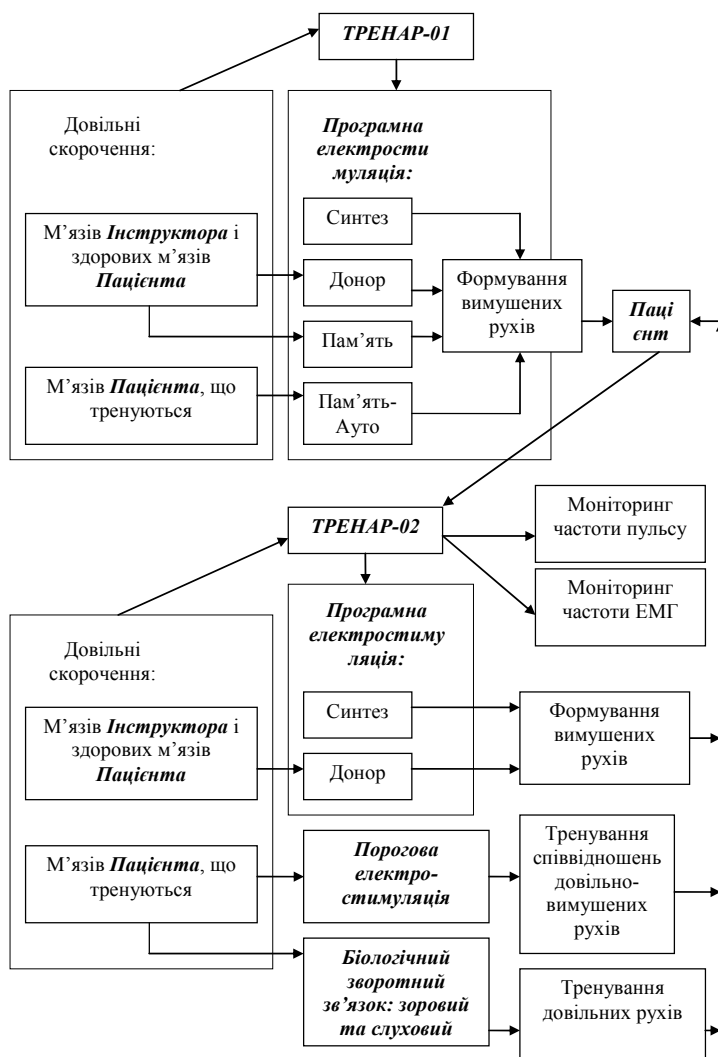


Рис. 7. Апарати ТРЕНАР як зовнішні контури керування рухами. Структурно-функціональна модель

Такі програми як «Донор» (за рахунок міжпівкульової взаємодії) або «Порогова стимуляція» (безпосередньо) «готують» і роблять пошкоджену моторну зону більш сприйнятливою до керуючих впливів, підсилюють ефективність аферентації як основного способу формування нової рефлекторної системи супраспинального контролю рухів замість втраченого або спотвореного патологією. Програми «Донор», «Поріг» і «Біотренування» передбачають активну участь пацієнта в тренуванні, дозволяють уникати монотонних процедур, самостійно гнучко змінювати ритм і інтенсивність рухів, які тренуються, поступово ускладнювати тренувальне завдання.

Основу цих програм становить «електроміографічний образ» м'язового скорочення, який виконує різні функції. Його використовують як детектор стану м'язової активності (норма, патологія) під час виконання примусових і довільних м'язових скорочень, модель (програму) формування примусо-

вих і довільних м'язових скорочень, модель комплексної активації сенсорних зон кори головного мозку — пропріоцептивної, зорової та слухової. Керування відновленням рухових функцій на базі апаратів «Тренар» задовольняє головним принципам реабілітації: ранній початок; систематичність і тривалість; адекватність реабілітаційних заходів на кожному етапі; активна участь пацієнта у реабілітаційному процесі.

Апарати ТРЕНАР-01 і ТРЕНАР-02 внесено до Державного реєстру медичної техніки та виробів медичного призначення, дозволені для використання в клінічній практиці на території України. Всебічна клінічна апробація апаратів у 17 клінічних і оздоровчих установах різних регіонів України підтвердила їхню ефективність для відновлення рухових функцій у дорослих і дітей (понад 15 000 пацієнтів).

## **РЕЗУЛЬТАТИ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.**

### **ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПЕРСОНАЛЬНОГО ВІДНОВЛЕННЯ УСНОГО МОВЛЕННЯ НА БАЗІ ТРЕНУВАНЬ ТОНКОЇ МОТОРИКИ КИСТІ**

Зв'язок рухових і мовленнєвих функцій, величина проекції кисті, її близькість до моторної мовленнєвої зони, позитивний вплив тренування рухів пальців рук на розвиток мовлення дитини склали теоретичну передумову розроблення нового методу і технології персонального відновлення моторного компонента мовлення на базі тренувань тонкої моторики кисті у хворих після інсульту з порушеннями мовлення за типом моторної або моторно-сенсорної афазії та порушеннями рухових функцій за типом геміпарезу [12–14].

Технологія відновлення мовленнєвих функцій використовує методи і програми тренувань кисті і пальців, які надає апаратно-програмний комплекс ТРЕНАР®. Рухи пальців рук для тренування вибираються за критеріями розвитку дрібної моторики кисті в онтогенезі, доступу передачі сигналів електростимуляції відповідним м'язам за допомоги поверхневих електродів, стану рухів кисті та пальців після інсульту [15]. Технологію реалізує комп'ютерний програмно-апаратний комплекс персонального відновлення мовлення «ПРОМОВА-1» (Рис. 8). Центальною ланкою комплексу є технічна система, яка складається з двох компонентів: електронні апарати керування рухами Тренар-01 і Тренар-02, за допомоги яких відбувається тренування рухів тонкої моторики ураженої кисті і пальців, і інформаційний компонент — спеціалізований програмний модуль «ProMova 1.0», який реалізовано в архітектурі ПК. Включення в технічну систему інформаційного компонента зумовлено проблемою багатокритеріального вибору параметрів тренувань, які здійснює лікар під час організації індивідуального підходу до реабілітації.

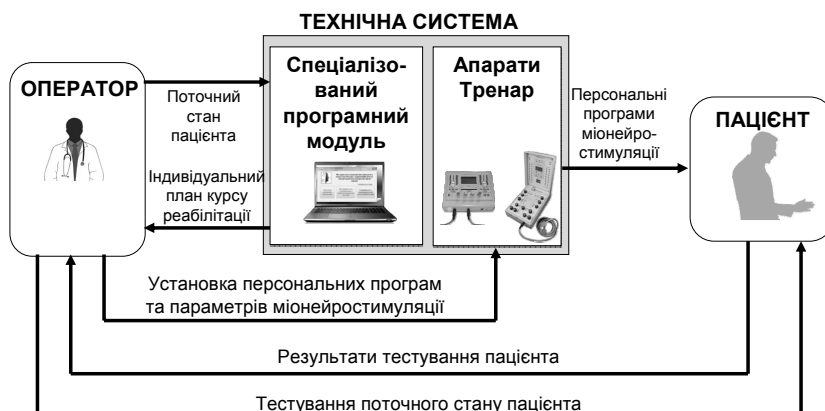
Визначення параметрів персонального реабілітаційного курсу тренування рухів кисті і пальців для відновлення мовлення базується на розроблених критеріях, вирішувальних правилах за спеціальними алгоритмами [15–16]. Спеціалізований програмний модуль забезпечує організацію інформаційно-консультаційної допомоги для/під час планування і проведення заходів з відновлення мовлення.

Клінічна апробація комп'ютерного комплексу персонального відновлення мовлення «ПРОМОВА-1» у хворих після інсульту на базі неврологічного відділення №1 Київської міської клінічної лікарні №3 (рис. 9) показала, що процент

покращень мовленнєвих функцій у хворих після інсульту (моторна афазія, правобічний геміпарез) досягає 74 % проти базового курсу — 41 % (рис. 9).

Кількісне експрес-оцінювання моторних і сенсорних порушень мовлення [17], яке визначає відновлення усного мовлення навіть в межах невеликої позитивної динаміки, підтвердило більшу ефективність відновлення у пацієнтів в ранньому періоді реабілітації (до 6 місяців після інсульту) та у разі тренування рухів тонкої моторики кисті за програмою «Донор».

Розглянута організація керування рухами тонкої моторики кисті для відновлення мовлення у хворих з руховими порушеннями за типом геміпарезу і порушеннями мовлення за типом моторної або моторно-сенсорної афазії є прикладом організації інтелектуального керування відновленням патологічно зміненої функції, в даному випадку усного мовлення, на базі зовнішнього контуру керування рухами кисті. Таким зовнішнім контуром є комп'ютерний програмно-апаратний комплекс персонального відновлення мовлення «ПРОМОВА-1» на базі тренувань дрібної моторики ураженої кисті, відновлення рухів якої опосередковано впливає на відновлення мовлення.



**Рис. 8.** Структурно-функціональна модель комп'ютерного програмно-апаратного комплексу персонального відновлення мовлення «ПРОМОВА-1»



а)



б)

**Рис. 9.** Сеанс тренування рухів кисті за програмами: а) «Донор», б) «Синтез» для відновлення мовлення (Моторна афазія. Правобічний геміпарез).

Зазначимо показники інтелектуального керування відновленням усного мовлення після інсульту.

- Єдність ситуаційної та кінцевої мети. Ситуаційна мета залежить від неврологічного статусу пацієнта, стану його рухових функцій, які визначають індивідуальний план реабілітаційного курсу: метод, програму, параметри і регламент тренування рухів кисті. Кінцева мета — це і відновлення рухів кисті, і відновлення моторного компоненту мовлення.

- Включення в технічну систему програмно-апаратного комплексу персонального відновлення мовлення «ПРОМОВА-1» інформаційного компоненту — спеціалізованого програмного модуля «ProMova 1.0» для вирішення проблеми багатокритеріального вибору параметрів тренувань тонкої моторики кисті для відновлення усного мовлення, які здійснює лікар під час організації індивідуального підходу до реабілітації.

### **ПЕРСПЕКТИВНІ ДОСЛІДЖЕННЯ**

Головною метою сучасних досліджень, розрахованих на ближню і дальню перспективу, є підвищення ефективності створених і нових технологій діагностики і реабілітації м'язових, мовленнєвих та інших функцій, які мають зв'язок з м'язовими, за рахунок наближення технологій до пацієнта, забезпечення індивідуального підходу до реабілітації, отримання оперативної інформації про стан пацієнта, формування індивідуальних планів відновного лікування/корегування пошкоджених патологією функцій, зручності масового використання створених технологій.

Дослідження, які спрямовано на *синтез технологій мобільної інформаційно-консультаційної допомоги лікарю у діагностиці стану рухових і мовленнєвих функцій, пошкоджених патологією, та формування індивідуальних планів реабілітації цих функцій*, передбачають розроблення нових методик кількісного оцінювання дефіциту рухових і мовленнєвих функцій у хворих після інсульту, алгоритмів, критеріїв, вирішувальних правил формування індивідуального плану реабілітації рухів і усного мовлення на базі кількісних характеристик глибини рухових і мовленнєвих порушень, розроблення мобільного спеціалізованого програмного модулю, який функціонує на смартфоні/планшеті для оперативної інформаційно-консультаційної допомоги лікарю у діагностиці та реабілітації рухів і усного мовлення. В цьому напрямку вже отримано перші результати [18, 19].

*Синтез технологій керування активністю м'язів для виконання координованих рухів*, методів і засобів *індивідуального формування складних координованих рухів кінцівок* на базі багатоканальних програмних міоелектростимуляторів передбачає розроблення гнучкої архітектури штучного синтезу активних фаз залучення м'язів у виконання складного руху та створення зручного інтерфейсу, на якому відображається сформована програма (модель) руху для допомоги оператору і пацієнту проводити індивідуальне відпрацювання окремих активних фаз м'язової активності у структурі складного координованого руху.

*Відновне лікування і профілактика дефектів постави*, як однієї з найактуальніших проблем сучасної ортопедії, передбачає розроблення нової технології діагностики та індивідуальної корекції дефектів постави на

базі використання двох методів корекції — біологічного зворотного зв'язку і програмної електростимуляції. Це надає можливість задіяти додаткові резерви організму до формування симетричної активності (симетричного тону) м'язів спини за рахунок комплексної аферентації: зорової, слухової і пропріоцептивної.

## **ВИСНОВКИ**

Розглянуто еволюцію синтезу біотехнічних систем керування рухами як зовнішніх контурів керування: відкритих типу «МІОТОН», адаптивних, які мають зворотні зв'язки типу «МІОСТИМУЛ», а також новий клас електронних апаратів цифрової медицини — персональних, біологічно адекватних, типу ТРЕНАР®.

Апарати біоелектричного керування рухами «МІОТОН» — це перші апарати, в яких використовували програмовану багатоканальну електростимуляцію нервово-м'язового комплексу за програмами у вигляді перетворених електроміографічних сигналів однойменних м'язів іншої людини. У поєднанні з багатоканальністю це дало змогу нав'язувати рухи, близькі до природних, і покращувати відновлення рухових функцій після важких захворювань центральної і периферичної нервової системи.

Введення зворотних зв'язків в апарати керування рухами «МІОСТИМУЛ» з автоматичного регулювання динамічного діапазону сигналу стимуляції, автоматичного зменшення рівня або відключення сигналу стимуляції у разі втоми м'язів внаслідок тренувальних процедур дало змогу підвищити відповідність нав'язаного руху програмному і уникнути включення захисних реакцій організму, які можуть спотворити штучно викликану аферентацію у разі перевищення рівня електростимуляції. Регулювання динамічного діапазону сигналу стимуляції доцільно не тільки з метою відновлення рухових функцій, але й в спеціальних завданнях лінійного керування.

Головною перевагою нового класу електронних апаратів цифрової медицини ТРЕНАР® є можливість організувати індивідуальний, біологічно адекватний підхід до відновлення рухових і мовленнєвих функцій залежно від виду, глибини патології і етапу реабілітації. Індивідуальний підхід до активації додаткових резервів мозкової діяльності на відновлення порушених рухових функцій досягається за рахунок використання оригінальних програм формування м'язових рухів, оснований на різних методах. Програми «Донор», «Поріг», «Біотренування» передбачають активну участь пацієнта в тренуванні, надають можливість уникати монотонних процедур, самостійно гнучко перебудовувати ритм і об'єм рухів, що тренуються, поступово ускладнювати тренувальне завдання. Все це сприяє реабілітації.

На базі оброблення і перетворення електроміографічних сигналів в зорові і слухові інформативні сигнали отримала розвиток теорія «образного усвідомлення» м'язової активності зоровим і слуховим аналізаторами кори головного мозку, що надало можливість задіяти додаткові резерви організму на відновлення м'язових функцій.

Оригінальна технологія персонального відновлення усного мовлення на базі тренувань тонкої моторики кисті у хворих після інсульту з порушеннями мовлення за типом моторної або моторно-сенсорної афазії та порушеннями рухових функцій за типом геміпарезу, яку реалізовано на базі

комп'ютерного програмно-апаратного комплексу «ПРОМОВА-1», тренування розширеної гами рухів кисті і пальців рук за технологією ТРЕНАР<sup>®</sup>, які враховують онтогенетичний зв'язок розвитку рухів кисті і усного мовлення, включення в комп'ютерний комплекс «ПРОМОВА-1» спеціалізованого програмного модуля «ProMova 1.0», який виконує функції інформативно-консультаційної допомоги лікарю під час проведення реабілітаційних заходів з відновлення усного мовлення уможливило організацію індивідуального підходу і підвищення ефективності відновлення у порівнянні з базовим курсом реабілітації.

Керування рухами на базі електронних систем як зовнішніх контурів, що виконують у власній системі роль відсутньої ланки і/або додаткового контуру в регуляції рухів, дає змогу цілеспрямовано відновлювати рухові функції або опосередковано впливати на інші, наприклад усне мовлення, яке має зв'язок з руховими.

Організація керування відновленням рухових і мовленнєвих функцій на базі зовнішніх контурів, роль яких виконують апарати ТРЕНАР, є прикладом нового міждисциплінарного напрямку в керуванні фізіологічними, зокрема руховими і мовленнєвими функціями, яке з'явилося на стику кібернетики, інформатики, нейробіології, медицини, та є прикладом інтелектуального керування відновленням патологічно змінених функцій, організованого на основі медико-фізіологічних і технічних знань.

Сучасні дослідження, розраховані на ближню і дальню перспективу, спрямовано на подальший розвиток таких пріоритетних напрямів у медицині, як індивідуальний підхід до лікування, цифрова медицина, мобільне здоров'я на базі нових інформаційних технологій. Мобільність створює умови для масового використання інноваційних технологій, наближує нові технології до пацієнта.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. 190525 СССР, МПК А 61b 4/06. Способ управления двигательными реакциями / Л.С. Алеев, Бунимович С.Г. СССР. № 1019769/31-16; заявл. 26.06.65; опубл. 29.12.66, Бюл. №2.
2. Алеев Л.С. Биоэлектрична система «Миотон» і рухові функції людини. *Вісн. АН УРСР*. 1969. Вип.4. С. 70–80.
3. Алеев Л.С., Вовк М.І., Горбанев В., Шевченко А. «Миотон» в управленні движеньями. Київ: Наук. думка, 1980. 142 с.
4. А. с. 321245 СССР, МПК А 61b 5/04. Способ управления движениями человека / Л. Алеев, С. Бунимович, М. Вовк, В. Горбанев, А. Шевченко. СССР. № 1455753/31-16; заявл. 22.06.1970; опубл. 03.09.1971.
5. А. с. 929 054 СССР, МПК А 61 В 5/04. Многоканальное устройство адаптивного биоэлектрического управления движениями человека / Л. Алеев, М. Вовк, В. Горбанев, А.Шевченко. СССР. № 2428608/28-13; заявл. 13.12.76; опубл. 25.05.82, Бюл. № 19.
6. А. с. 976 952 СССР, МПК 61 В 5/04, А 61 N 1/36. Многоканальное устройство адаптивного биоэлектрического управления движениями человека / Л. Алеев, М.Вовк, В. Горбанев, А. Шевченко СССР. № 2436412/28-13; заявл. 03.01.77; опубл. 30.11.82, Бюл. № 44.
7. Bioelectrically controlled electric stimulator of human muscles: United States Patent 4,165,750 Aug. 28, 1979.
8. Гриценко В.І., Котова А., Вовк М. и др. Інформаційні технології в біології та медицині. Курс лекцій. Київ: Наук. думка. 2007. 382 с.

9. Вовк М.И. Биоинформационная технология управления движениями человека. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2010. Вып. 161. С. 42–52.
10. «Тренар» — инновационная технология восстановления движений. Матеріали Міжнародного науково-практичного форуму «Наука і бізнес — основа розвитку економіки». Дніпропетровськ, 2012. С.204–206.
11. Вовк М.И. Биоинформационная технология управления движениями как направление биологической и медицинской кибернетики. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2013. Вып. 174. С. 56–70.
12. Вовк М.И., Галян Е.Б. Восстановление моторного компонента речи на базе управления мышечными движениями. Теоретическое обоснование. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2012. Вып. 167. С.51–60.
13. Спосіб лікування мовних порушень: пат. на винахід № 111388 Україна, МПК (2006.01), А61N 1/36; № а 2014 06 092; заявл. 03.06.2014, опубл. 25.04.16, Бюл. № 8. 4 с.
14. Вовк М.И., Галян Е.Б. Персонализированная биотехническая система для восстановления речи. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2015. Вып. 179. С. 5–19.
15. Вовк М.И., Галян Е.Б. Персонализированная биотехническая система для восстановления речи. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2015. Вып. 179. С. 5–19.
16. Вовк М.И., Галян Е.Б. Организация интеллектуального управления движениями кисти для восстановления речи. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2016. Вып. 184. С. 25–43.
17. Галян Е.Б. Специализированный программный модуль технологии восстановления речи, архитектура и функциональное взаимодействие его компонентов. *Управляющие системы и машины*. 2014. № 6. С. 52–58.
18. Вовк М.И., Пелешок С.Р., Галян Е.Б., Овчаренко М.А. Методика оценки моторных и сенсорных нарушений речи. *Сборник статей науч.-информ. центра «Знание» по материалам XI международной заочной научно-практической конференции: «Развитие науки в XXI веке» 3 ч., г. Харьков: сборник со статьями*. Д.: научно-информационный центр «Знание», 2016. С. 70–76.
19. Вовк М.И., Куцяк О.А., Лаута А.Д., Овчаренко М.А. Інформаційний супровід досліджень динаміки відновлення рухів після інсульту. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2017. №3 (189). С. 61–78.
20. Вовк М.И., Галян Е.Б., Куцяк О.А., Лаута А.Д. Формування індивідуального комплексу керувальних впливів для реабілітації рухів і мовлення після інсульту. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2018. №3 (193). С. 43–63.

Получено 14.09.2018

## REFERENCES

1. Inventor's certificate 190525 USSR. The method of motor control / L. Aleev, S. Bunimovich. No 1019769/31-16; claimed 26.06.65; published 29.12.66, Bull. No 2. (in Russian).
2. Aleev L.S. Bioelectrical system "Mioton" and motor functions of a person. Bull. of AS of USSR. 1969. Iss. 4. P. 70–80 (in Russian).
3. Aleev L.S., Vovk M.I., Gorbanev V., Shevchenko A. «Mioton» in motor control. Kiev: Nauk. dumka, 1980. 142 p. (in Russian).
4. Inventor's certificate 321 245 USSR. The method of motor control of a person / L. Aleev, S. Bunimovich, M. Vovk, V. Gorbanev, A. Shevchenko. No1455753/31-16; claimed 22.06.1970; registered 03.09.1971. (in Russian).
5. Inventor's certificate 929 054 USSR. Multichannel device for adaptive bioelectrical motor control of a person / L. Aleev, M. Vovk, V. Goranev, A. Shevchenko. No 2428608/28-13; claimed 13.12.76; published 23.05.82, Bull. № 19 (in Russian).
6. Inventor's certificate 976 952 USSR Multichannel device for adaptive bioelectrical motor control of a person / L. Aleev, M. Vovk, V. Goranev, A. Shevchenko. No 2436412/28-13; claimed 03.01.77; published 30.11.82, Bull. №44. (in Russian).
7. Bioelectrically controlled electric stimulator of human muscles: United States Patent 4,165,750 Aug. 28, 1979.

8. Gritsenko V.I., Kotova A., Vovk M et.al. Information technology in Biology and Medicine. Lecture course. Kyiv: Nauk. Dumka, 2007. 382 p. (in Ukrainian).
9. Vovk M.I. Bioinformatic technology of motor control of a person. *Kibernetika i vyčislitelnaâ tehnika*. 2010. Iss. 161. P. 42–52 (in Russian).
10. “Trenar” — innovative technology for motor restoration. Materials of the International scientific — practical forum «The Science and Business — a basis of development of economy». Dnepropetrovsk, 2012. P. 204.
11. Vovk M.I. Bioinformatic technology of motor control as the direction of biological and medical cybernetics. *Kibernetika i vyčislitelnaâ tehnika*. 2013. № 174. P. 56–70 (in Russian).
12. Vovk M.I., Galyan Ye.B. Restoring of motor component of speech based on muscle movement control. Theoretical grounding. *Kibernetika i vyčislitelnaâ tehnika*. 2012. № 167. P. 51–60 (in Russian).
13. The way to treat speech disorders: pat. UA, A61N 1/36, no. 111388, claimed 03.06.2014, published 25.04.2016, Bulletin no 18 (in Ukrainian).
14. Vovk M.I., Galyan Ye.B. Personalized biotechnical system to restore speech. *Kibernetika i vyčislitelnaâ tehnika*.. 2015. Iss. 179. P. 5–19 (in Russian).
15. Vovk M.I., Galyan Ye.B. Organization of Intelligent Hand Movements Control to Restore Speech. *Kibernetika i vyčislitelnaâ tehnika*. 2016. Iss. 184. P. 25–43 (in Russian).
16. Galyan Ye.B. Specialized software module of speech rehabilitation technology, architecture and functional interaction of its components. *Control Systems and Machines*. 2014. Iss. 6. P. 52–58 (in Russian).
17. Vovk M.I., Peleshok S.R., Galyan Ye.B. Ovcharenko M.A. The method of assessment of motor and sensory speech disorders. *Collected papers of scientific-information center "Knowledge" based on XI International correspondence scientific-practical conference: «The development of science in the XXI century», part 3. Kharkiv: collected papers. Donetsk: Scientific-information center "Knowledge", 2016. P. 70–76 (in Russian).*
18. Vovk M.I., Kutsyak O.A., Lauta A.D., Ovcharenko M.A. Information Support of Researches on the Dynamics of Movement Restoration After the Stroke. *Kibernetika i vyčislitelnaâ tehnika*.. 2017. № 3 (189). P. 61–78 (in Ukrainian).
19. Vovk M.I., Galyan Ye.B., Kutsyak O.A., Lauta A.D. Formation of individual complex of control actions for motor and speech rehabilitation after a stroke. *Kibernetika i vyčislitelnaâ tehnika*. 2018. № 3 (193). P. 43–63. (in Ukrainian).

Recieved 14.09.2018

Вовк М.І., канд. биол. наук, старш. науч. сотр.,  
 зав. отд. биоэлектрического управления и медицинской кибернетики  
 e-mail: vovk@irtc.org.ua; imvovk3940@gmail.com  
 Международный научно-учебный центр  
 информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины,  
 п-кт Академика Глушкова, 40, г. Киев, 03680 ГСП, Украина

#### ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯМИ. ЭВОЛЮЦИЯ СИНТЕЗА И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Эволюция синтеза технологий биоэлектрического управления движениями человека представлена в анализе нескольких поколений программных миоэлектростимуляторов типа «МИОТОН», «МИОСТИМУЛ» и нового класса аппаратов цифровой медицины ТРЕНАР®. Особенностью этих аппаратов является использование специально обработанных электромиографических (ЭМГ) сигналов в качестве программ управления сигналами электростимуляции и обратной связи. Рассмотрены принципы, критерии, методы, программы, на базе которых синтезирована инновационная технология персональной тренировки / восстановления движений ТРЕНАР®. Представлен компьютер-



ный программно-аппаратный комплекс «ПРОМОВА-1», который реализует новую технологию персонального восстановления устной речи у больных после инсульта на базе оригинальных методик тренировок тонкой моторики кисти. Перспективные исследования направлены на синтез технологий мобильной информационно-консультационной помощи врачу в диагностике дефицита двигательных и речевых функций и формировании индивидуальных планов реабилитации, на синтез технологий управления согласованной активностью мышц во время выполнения координированных движений и восстановительного лечения дефектов осанки.

**Ключевые слова:** биоэлектрическое управление, движение, речь, координация, осанка, персональная реабилитация, методы, программы, миоэлектростимуляция, цифровая медицина.

Vovk M.I., PhD (Biology), Senior Researcher,  
Head of Bioelectrical Control & Medical Cybernetics Department  
e-mail: vovk@irtc.org.ua; imvovk3940@gmail.com  
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. Glushkov av., 40, Kiev, 03187, Ukraine

#### INFORMATION TECHNOLOGY OF MOVEMENT CONTROL. EVOLUTION OF SYNTHESIS AND DEVELOPMENT PROSPECTS

**Introduction.** Movement training is one of the main factors to mobilize person's reserves for movement restoration

**The purpose of the article** is to consider the theoretical and technological bases of the evolution of synthesis of biotechnical systems for motion control, to show the role of new information technologies and means of digital medicine in the synthesis of systems for personal control of movements for the restoration of motor and speech functions that are affected by pathology.

**Results.** The evolution of the synthesis of technologies of bioelectric control of human movements is given in the analysis of several generations of programmed muscle electrostimulators such as MIOTON, MIOSTIMUL and the new class of digital medicine devices TRENAR®. The main feature of these devices is the use of specially processed electromyographic (EMG) signals as programs to control signals of electrical stimulation and feedback. The principles, criteria, methods, programs, on the basis of which the innovative technology of personal training / restoration of movements TRENAR® is synthesized are considered. The computer program-apparatus complex "PROMOVA-1" is presented, that implements new technology of personal reconstruction of oral speech after a stroke based on the original techniques of fine motor hand training. Prospective studies are aimed at the synthesis of mobile informational and consulting assistance to the doctor in diagnosing the deficit of motor and speech functions and the formation of individual rehabilitation plans; at the synthesis of technologies to control muscle activity coordination during the performance of coordinated movements and rehabilitation treatment of posture defects.

**Conclusion.** Current researches are aimed at the further development of such priority areas in medicine as an individual approach to treatment, digital medicine, mobile health based on new information technologies.

**Keywords:** bioelectric control, movement, speech, coordination, posture, personal rehabilitation, methods, programs, myoelectrostimulation, digital medicine.

## До 100-річчя академіка НАН України БОРИСА ЄВГЕНОВИЧА ПАТОНА

---



27 листопада 2018 р. виповнилося 100 років видатному вченому в галузі зварювання, металургії і технології металів, Президенту НАН України (з 1962), директору Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона НАНУ (з 1953) **Борису Євгеновичу Патону**.

Фундаментальні дослідження Б.Є. Патона та його учнів в галузі взаємодії зварювальних джерел нагріву з розплавленим металом стали основою створення нової галузі металургії — спеціальної електрометалургії. Академік Б.Є. Патон першим почав і розвинув дослідження з використання зварювальних процесів в космічних технологіях, які було успішно застосовано космонавтами під час орбітальних польотів кораблів і за умов відкритого космосу. Він запропонував і очолив масштабні дослідження щодо використання зварювальних технологій в лікувально-хірургічній практиці.

Борис Євгенович Патон є автором і співавтором понад 720 винаходів (500 іноземних патентів), більш як 1200 публікацій, 20 наукових монографій. Він є членом багатьох закордонних академій наук, з 1993 року — президент Міжнародної асоціації академій наук.

За великі заслуги Б.Є. Патона удостоєно Ленінської і Державної премій, високих звань двічі Героя Соціалістичної Праці і Героя України, чотирьох орденів Леніна, орденів Трудового Червоного Прапора, Дружби народів, князя Ярослава Мудрого V ступеня.

Редакційна колегія журналу «Кібернетика і обчислювальна техніка» від щирого серця вітає Бориса Євгеновича з ювілеєм, бажає міцного здоров'я, натхнення і подальших творчих успіхів.

# Системный указатель статей, опубликованных в 2018 году

---

## Информатика и информационные технологии

- СУРОВЦЕВ І.В., ГАЛІМОВ С.К., ТАТАРІНОВ О.Е. Інформаційна технологія визначення концентрації токсичних елементів в об'єктах навколишнього середовища ..... 1(191)
- KYYKO V.M. Maximum Matching in Weighted Bipartite Graphs ..... 1(191)
- L.S. FAINZILBERG, N.A. MATUSHEVYCH Comparative Evaluation of Convergence's Speed of Learning Algorithms for Linear Classifiers by Statistical Experiments Method ..... 2(192)
- ГРИЦЕНКО В.І., ГЛАДУН А.Я., РОГУШИНА Ю.В. Моделі та методи використання семантичних wiki-ресурсів як джерела знань для поповнення формальних онтологій предметних областей ..... 2(192)
- REVUNOVA E.G., RACHKOVSKIY D.A. Random Projection and Truncated SVD for Estimating Direction of Arrival in Antenna Array ..... 3(193)
- ANTONOMOV M.Yu. Information Technology for Constructing the Composite Indices for Data of Different Types Used in Medical and Environmental Studies ..... 3(193)
- GRITSENKO V.I., RACHKOVSKIY D.A., REVUNOVA E.G. Neural Distributed Representations of Vector Data in Intelligent Information Technologies ..... 4(194)
- ЕРМАКОВА И.И., НИКОЛАЕНКО А.Ю., СОЛОПЧУК Ю.М., ГРИЦАЮК О.В., ТАДЕЕВА Ю.П. Информационная смартфон технология для прогноза состояния здоровья человека в экстремальных условиях среды ..... 4(194)

## Интеллектуальное управление и системы

- ГРИЦЕНКО В.І., ВОЛКОВ О.Є., КОМАР М.М., БОГАЧУК Ю.П. Інтелектуалізація сучасних систем автоматичного керування безпілотними літальними апаратами ..... 1(191)
- ZHITECKII L.S., SOLOVCHUK K.Yu. Adaptive Stabilization of Some Multivariable Systems with Nonsquare Gain Matrices of Full Rank ..... 2(192)
- BOBK M.I., ГАЛЯН Є.Б., КУЦЯК О.А., ЛАУТА А.Д. Формування індивідуального комплексу керувальних впливів для реабілітації рухів і мовлення після інсульту ..... 3(193)
- STEPASHKO V.S. Formation and Development of Self-Organizing Intelligent Technologies of Inductive Modeling ..... 4(194)

## Медицинская и биологическая кибернетика

- BACHYNSKY M.V., YAVORSKY B.I. Informational Aspects of the Haptic Stimulation by the Light for Correction of the Human' State ..... 1(191)

КАПЛІН І.В., КОЧИНА М.Л., ФІРСОВ А.Г. Концепція телемедичної системи для експрес-оцінювання рівня внутрішньоочного тиску .....	1(191)
BUZYNOVSKY A.B., KOVALENKO A.S., BAYAZITOV N.R., GODLEVSKY L.S. The Effectiveness of Surgeon Decision on Pain Syndrome of Pelvic Origin Treatment in Women Estimated with the Model of Decision Tree .....	2(192)
RYSOVANA L.M., VYSOTSKA O.V. Information System of Detection of Emotional and Cognitive Disorders in Patients with Discirculatory Encephalopathy .....	2(192)
ЗЛЕПКО С.М., ЧЕРНИШОВА Т.А., МАСВСЬКИЙ О.Е., КРИВОНОСОВ В.Є., АЗАРХОВ О.Ю. Інформаційна технологія визначення циркулюючих пухлинних клітин в крові людини .....	2(192)
ШАХЛИНА Л.Я.-Г., АРАЛОВА Н.И. Прогнозирование реакции организма спортсменов на вдыхание гипоксических смесей на математической модели функциональной системы дыхания .....	3(193)
КИФОРЕНКО С.И., ГОНТАРЬ Т.М., ИВАСЬКИВА Е.Ю., ОБЕЛЕЦ Т.А. Информационная система поддержки принятия решений для контроля и коррекции физического здоровья .....	3(193)
KOZAK L.M., KOVALENKO A.S., KRYVOVA O.A., ROMANYUK O.A. Digital Transformation in Medicine: From Formalized Medical Documents to Information Technologies of Digital Medicine .....	4(194)
BOBK M.I. Інформаційна технологія керування рухами. Еволюція синтезу і перспективи розвитку .....	4(194)

#### Информационные сообщения

Національній академії наук України — 100 років .....	4(194)
До 100-річчя академіка НАН України БОРИСА ЄВГЕНОВИЧА ПАТОНА .....	4(194)

#### Вниманию авторам

1. Рукопись предоставляется на белой бумаге в двух экземплярах, с обязательными рубриками: введение, постановка задачи, цель, результаты, четко сформулированные выводы (язык — украинский, английский, русский, 12—18 с.) и электронная версия.

Статья завершается списком литературы в двух вариантах:

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

- References — фамилии и инициалы авторов — транслитерация, перевод названия статей на английский язык, название журнала — как указано в данном журнале для ссылок на английском языке.

К рукописи прилагаются:

- аннотации — на русском и украинском языках (УДК, фамилия, инициалы автора/ов, место работы, адрес организации, название статьи, 5—6 строк текста, ключевые слова), на английском языке (фамилия, инициалы автора/ов, место работы, адрес организации, 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: ФИО, ученую степень, научное звание, должность, отдел, место работы, почтовый адрес организации, телефон (служ., моб., дом.), E-mail, авторские идентификаторы ORCID или ResearcherID.

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

3. Требования к текстовому файлу представлены на сайте [kvt-journal.org.ua](http://kvt-journal.org.ua)