

Кібернетика 1 (207)/2022 та обчислювальна техніка

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

ЗМІСТ

25-ти річний досвід діяльності Міжнародного науково-навчального центру інформаційних технологій та систем	3
---	---

Інформатика та інформаційні технології

ГРИЦЕНКО В.І., ТИМОФІЄВА Н.К. Знаходження підкласів розв’язних задач в комбінаторній оптимізації та штучному інтелекті за структурою вхідної інформації	5
БАБАК О.В., СУРОВЦЕВ І.В. Редукція даних як метод інтелектуалізації інформаційних технологій	18
ЄРМАКОВА І.Й., НІКОЛАСНКО А.Ю., БОГАТЬОНКОВА А.І., ТАДЕСВА Ю.П., Мультифункційна інформаційна система моделювання термофізіологічного стану людини за екстремальних умов	32

Інтелектуальне керування та системи

ЖИТЕЦЬКИЙ Л.С. Проблеми та перспективи інтелектуалізації систем автоматичного керування	46
---	----

Медична та біологічна кібернетика

КОВАЛЕНКО О.С., КОЗАК Л.М., НАДЖИФІАН ТУМАНДЖАНІ М., РОМАНЮК О.О. Досвід та перспективи створення медичних інформаційних систем та інформаційних технологій підтримки надання медичної допомоги	59
КІФОРЕНКО С.І., БЄЛОВ В.М., ГОНТАР Т.М. Принцип ієрархічності як основа дослідження біологічних систем	74
ВОВК М.І., КУЦЯК О.А. Інформаційні технології керування м’язовими функціями. Ретроспективний аналіз та перспективи розвитку	87

До уваги авторів	101
------------------------	-----

Cybernetics and Computer Engineering

1 (207)/2022

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

CONTENTS

25 Years of Experience of the International Research and Training Center for Information Technologies and Systems 3

Informatics and Information Technologies

GRITSENKO V.I., TYMOFIJEVA N.K. Finding Subclasses of Solvable Problems in Combinary Optimization and Artificial Intelligence by Structure of Input Information . 5

BABAK O.V., SUROVTSEV I.V. Data Reduction as a Method of Intellectualization of Information Technologies 18

YERMAKOVA I.Yo., NIKOLAIENKO A.Yu., BOGATONKOVA A.I., TADEEVA Yu.P. Multifunctional Information System for Modeling of Human Thermophysiological State in Extreme Environments 32

Intelligent Control and Systems

ZHITECKII L.S. Problems and Prospects for the Intellectualization of Automatic Control Systems 46

Medical and Biological Cybernetics

KOVALENKO O.S., KOZAK L.M., NAJAFIAN TUMAJANI M., ROMANYUK O.O. Experience and Prospects of Creating The Medical Information Systems and Information Technologies to Support Medical Care 59

KIFORENKO S.I., BELOV V.M., HONTAR T.M. The Hierarchy Principle as the Basis of Biological Systems Research 74

VOVK M.I., KUTSIK O.A. Information Technologies for Muscle Functions Control. Retrospective Analysis and Development Prospects 87

To Attention of Authors 101

25-ТИ РІЧНИЙ ДОСВІД ДІЯЛЬНОСТІ МІЖНАРОДНОГО НАУКОВО-НАВЧАЛЬНОГО ЦЕНТРУ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА СИСТЕМ



Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем НАН України та МОН України створено п'ятого травня 1997 року за рішеннями Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України. Формування наукового колективу Міжнародного центру започатковано у лавах Кібернетичного центру. Головною метою 25-річної діяльності Міжнародного центру було і залишається здійснення пріоритетних наукових досліджень та розроблень у галузі інформатики та інформаційних технологій для промисловості, транспорту, економіки та інших галузей інноваційного розвитку країни.

Треба відзначити здобутки провідних наукових шкіл, на чолі яких стояли видатні українські вчені, співробітники Міжнародного центру: академіки НАНУ В.І. Скурихін, О.Г. Івахненко, М.М. Амосов та О.О. Бакаєв.

Глибоке розуміння викликів та можливостей поглиблення процесів інформатизації, цифровізації та інтелектуалізації всіх сфер суспільного життя дало змогу Міжнародному центру стати ініціатором нового наукового напрямку — створення інтелектуальних інформаційних технологій. Такі технології потребують нових інтелектуальних методів аналізу різномірної інформації. Саме це зумовило трансформацію головних наукових напрямів Міжнародного центру, які наразі охоплюють розроблення інтелектуальних інформаційних технологій образного мислення, технологій інтелектуального керування складними динамічними об'єктами, нейромережевих технологій, технологій інтелектуальної робототехніки, інформаційних технологій цифрової медицини, електронного навчання, екологічного моніторингу та інтелектуального моделювання соціально-економічних процесів.

Наукові дослідження та розроблення Міжнародного центру є інноваційними та орієнтованими на вирішення найважливіших проблем інтелектуалізації в різних галузях знань. Розроблені ефективні інструментальні засоби, технології, науково-технічні рішення уможливають у найближчі терміни розширення роботи зі створення багатоцільових високоінтелектуалізованих комплексів широкого застосування.

Цей ювілейний номер журналу спрямовано на висвітлення окремих фундаментальних та прикладних результатів, одержаних за різними напрямками протягом 25-ти років діяльності Міжнародного центру.

Зичимо колективу Міжнародного центру подальших творчих успіхів.

Редакційна колегія журналу

25 YEARS OF EXPERIENCE OF THE INTERNATIONAL RESEARCH AND TRAINING CENTER FOR INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

The International Research and Training Center for Information Technologies and Systems was established on May 5, 1997 by the National Academy of Sciences of Ukraine and the Ministry of Education and Science of Ukraine. The forming of the scientific team of the International Center has been initiated in the ranks of the Cybernetic Center. The main purpose of the 25 years activities of the International Center was and remains the implementation of priority research and development in the field of informatics and information technologies (IT) for industry, transport, economy and other areas of innovative development of the country.

It should be noted the achievements of leading scientific schools, headed by prominent Ukrainian scientists, employees of the International Center: Academicians V.I. Skurikhin, O.G. Ivakhnenko, M.M. Amosov and O.O. Bakaev.

A deep understanding of the challenges and opportunities to deepen the processes of informatization, digitalization and intellectualization of all spheres of public life allowed the International Center to initiate a new scientific field — the creation of intelligent information technologies. Such technologies require new intelligent methods of analyzing the heterogeneous information. This has led to the transformation of the main research areas of the International Center, which currently include the development of intelligent IT of imaginative thinking, intelligent control technologies for complex dynamic objects, neural network technologies, intelligent robotics technologies, digital medicine IT, IT for e-learning, environmental monitoring and social-economic processes.

The research and development of the International Center are innovative and focused on solving the most important problems of intellectualization in various fields of knowledge. Developed effective tools, technologies, scientific and technical solutions make it possible in the near future to expand the work on the creation of multi-purpose highly intelligent complexes of wide application.

This jubilee issue is aimed at highlighting some fundamental and applied results obtained in various areas during the 25 years of the International Center.

We wish the staff of the International Center for Further Creative Success.

Editorial board

DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt207.01.005>

УДК: 519.816 CC BY-NC

ГРИЦЕНКО В.І., член-кореспондент НАН України,
почесний директор Міжнародного науково-навчального
центру інформаційних технологій та систем
НАН України і МОН України
ORCID: 0000-0003-4813-6153, e-mail: vig@irtc.org.ua

ТИМОФІЄВА Н.К., д-р техн. наук, старш. наук. співроб.,
пров. наук. співроб. від. комплексних досліджень інформаційних технологій
ORCID: 0000-0002-0312-1153, e-mail: tymnad@gmail.com
Міжнародний науково-навчальний центр
інформаційних технологій та систем
НАН України та МОН України,
пр. Акад. Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна

ЗНАХОДЖЕННЯ ПІДКЛАСІВ РОЗВ'ЯЗНИХ ЗАДАЧ В КОМБІНАТОРНІЙ ОПТИМІЗАЦІЇ ТА ШТУЧНОМУ ІНТЕЛЕКТІ ЗА СТРУКТУРОЮ ВХІДНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

***Вступ.** В літературі для деяких класів задач комбінаторної оптимізації описано підкласи, які мають певну структуру вхідної інформації із чіткою природою, для яких відомо спосіб аналітичного знаходження глобального розв'язку без перебору варіантів. Ці підкласи задач називають розв'язними. З їхньою допомогою можна зводити нерозв'язні задачі комбінаторної оптимізації до розв'язних.*

***Мета статті.** Для розв'язання задач комбінаторної оптимізації виділено такі основні підходи: а) методи та алгоритми, ґрунтовані на частковому переборі варіантів; б) методи і алгоритми, ґрунтовані на розпізнаванні структури вхідної інформації. До другого підходу належать роботи зі знаходження підкласів розв'язних задач та розроблення алгоритмів розпізнавання відповідно до цих підкласів структури вхідної інформації. Мета роботи полягає у тому, щоб для різних класів задач комбінаторної оптимізації за структурою вхідної інформації виділити підкласи, для яких за розробленими правилами аналітично знаходити глобальний розв'язок.*

***Методи.** Для виділення підкласів розв'язних задач використано метод моделювання вхідної інформації функціями натурального аргументу. Для цього вхідні дані, які задано скінченними послідовностями, подамо функціями натурального аргументу, одна з яких комбінаторна. Для різних таких функцій, які надано як лінійні, періодичні та опуклі, визначаються як максимальні, так і мінімальні глобальні значення цільової функції.*

***Результати.** Для різних класів задач комбінаторної оптимізації та штучного інтелекту за структурою вхідних даних виділено підкласи розв'язних задач. Знайдено глобальні мінімуми та максимуми для задач про призначення, комівояжера, розміщення об'єктів на заданій поверхні.*

Висновки. Використання методу моделювання структури вхідних даних функціями натурального аргументу дає змогу зводити деякі нерозв'язні задачі комбінаторної оптимізації до розв'язних. Для останніх нескладно знаходити аргумент (комбінаторну конфігурацію), для якого цільова функція набуває глобальних мінімуму та максимуму, а також сформулювати вираз, за яким знаходять її значення. В задачах штучного інтелекту виділення підкласів розв'язних задач проводять як за ознакою подібності, так і за структурою вхідних даних. Їхнє використання дає змогу зводити нерозв'язні задачі до розв'язних.

Ключові слова: підкласи розв'язних задач, функція натурального аргументу, комбінаторна оптимізація, міри подібності, цільова функція.

ВСТУП

Значна частина класів задач комбінаторної оптимізації є нерозв'язними з точки зору їхньої обчислювальної складності. Як правило, за обчислювальною складністю їх розділяють на такі, які можна розв'язати за певним поліноміальним алгоритмом (клас P), і які не піддаються ефективному алгоритмічному розв'язку (клас NP -повні задачі). Але в літературі для деяких класів задач комбінаторної оптимізації описано підкласи, що мають певну структуру вхідної інформації з чіткою природою, для яких відомо спосіб аналітичного знаходження глобального розв'язку без перебору варіантів. Ці підкласи задач називають розв'язними. З їхньою допомогою можна зводити нерозв'язні задачі комбінаторної оптимізації до розв'язних.

Для розв'язання задач комбінаторної оптимізації виділимо такі основні підходи [1]: а) методи та алгоритми, ґрунтовані на частковому переборі варіантів; б) методи та алгоритми, ґрунтовані на розпізнаванні структури вхідної інформації. До другого підходу належать роботи зі знаходження підкласів розв'язних задач та розроблення алгоритмів розпізнавання структури вхідної інформації відповідно до цих підкласів. Для виділення підкласів розв'язних задач використано метод моделювання вхідної інформації функціями натурального аргументу. Для цього вхідні дані, які задано скінченними послідовностями, подамо функціями натурального аргументу, одна з яких комбінаторна. Для різних таких функцій, які надано як лінійні, періодичні та опуклі, визначаються як максимальні, так і мінімальні глобальні значення цільової функції.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У розв'язанні задач комбінаторної оптимізації методами, які ґрунтуються на розпізнаванні структури вхідної інформації, зусилля дослідників спрямовано на знаходження підкласів розв'язних задач та розроблення алгоритмів розпізнавання структури вхідної інформації, що відповідає цим підкласам. Дослідження таких випадків поклало початок науковому напрямку, який полягає у виділенні підкласів розв'язних задач та знаходження для них глобального оптимального розв'язку без перебору варіантів. Аналіз класів задач комбінаторної оптимізації дає змогу виявити їхні характерні властивості, узагальнити та розвинути цей напрям. В літературі, в основному, описано розв'язні задачі з класу задач комівояжера. Відомо такі випадки, як матриці Ф. Супніка, К. Кальмансона, В. Демиденка, Г. Монжа [2–5]. Описані в

літературі оговорені розв'язні випадки для задач комівояжера, квадратичної задачі про призначення обмежуються частковими випадками і не можуть бути узагальнені. Для знаходження підкласів розв'язних задач і визначення в них глобального оптимуму в літературі не описано загальних методів, цей процес не ґрунтується на строгих правилах і є пов'язаним з великими труднощами.

Мета статті. Як було оговорено вище, для розв'язання задач комбінаторної оптимізації виділено такі основні підходи: а) методи та алгоритми, що ґрунтуються на частковому переборі варіантів; б) методи і алгоритми, що ґрунтуються на розпізнаванні структури вхідної інформації. До другого підходу належать роботи зі знаходження підкласів розв'язних задач та розроблення алгоритмів розпізнавання відповідно до цих підкласів структури вхідної інформації. Мета роботи полягає в тому, щоб для різних класів задач комбінаторної оптимізації за структурою вхідної інформації виділити підкласи, для яких аналітично знаходити глобальний розв'язок за розробленими правилами.

Використання моделювання вхідної інформації функціями натурального аргументу дає змогу виділяти нові підкласи розв'язних задач в комбінаторній оптимізації. Подамо математичну модель задачі комбінаторної оптимізації та змодельємо вхідні дані функціями натурального аргументу.

МОДЕЛЮВАННЯ СТРУКТУРИ ВХІДНИХ ДАНИХ ФУНКЦІЯМИ НАТУРАЛЬНОГО АРГУМЕНТУ

Задачі комбінаторної оптимізації задають однією (A) або кількома множинами, наприклад A та B [1]. Назвемо ці множини *базовими*. Наявними є два типи задач. Для *першого* типу кожному з цих множин подамо у вигляді графа, вершинами якого є її елементи, а кожному ребру поставлено у відповідність число $c_{rs} \in R$, яке називають вагою ребра (R — множина дійсних чисел); $r \in \{1, \dots, n\}$, $s \in \{1, \dots, \tilde{n}\}$, n — кількість елементів множини A , \tilde{n} — кількість елементів множини B . Покладемо, що $n = \tilde{n}$. Між елементами цих множин існують зв'язки, числове значення яких назвемо вагами. Величини c_{rs} є вхідними даними, які задамо матрицями. Для *другого* типу задач між елементами заданої множини зв'язків не існує, а вагами є числа $v_j \in R$, $j \in \{1, \dots, n\}$, яким у відповідність поставлено деякі властивості цих елементів, числові значення яких задають скінченними послідовностями, що також є вхідними даними. Ці величини визначають значення цільової функції.

Для обох типів задач з елементів однієї або кількох із заданих множин утворюється комбінаторна множина W — сукупність комбінаторних конфігурацій певного типу (перестановки, вибірки різних типів, розбиття тощо). На елементах w комбінаторної множини W уводиться цільова функція $F(w)$. Необхідно знайти елемент w^* множини W , для якого $F(w)$ набуває екстремального значення за виконання заданих обмежень.

Опишемо метод моделювання вхідних даних функціями натурального аргументу. Значення ваг між елементами множин A та B задамо однією або двома симетричними або несиметричними матрицями

C та $Q(w^k)$, де $Q(w^k)$ — комбінаторна матриця, $w^k \in W$ — аргумент цільової функції (комбінаторна конфігурація), $k \in \{1, \dots, q\}$ — позначає порядковий номер w^k у множині W , q — їхня кількість.

Подамо елементи h наддіагоналей симетричної комбінаторної матриці $Q(w^k)$ комбінаторною функцією $\beta(f(j), w^k)|_1^m$, а елементи h наддіагоналей симетричної матриці C — функцією натурального аргументу

$$\varphi(j)|_1^m = (\varphi(1), \dots, \varphi(m)),$$

де $m = \frac{n(n-1)}{2}$ — кількість елементів h наддіагоналей матриць C та $Q(w^k)$, $h = \overline{1, n-1}$. Якщо матриці $Q(w^k)$ та C — несиметричні, тоді $\beta(f(j), w^k)|_1^m$ та $\varphi(j)|_1^m$ містять усі їхні елементи, а $m = n^2$ (або $m = n \tilde{n}$). Для задач, які розв'язуються на перестановках, цільова функція набуває вигляду:

$$F(w^k) = \sum_{j=1}^m \beta_j(f(j), w^k) \varphi(j). \quad (1)$$

Ознаки, за якими виділяють підкласи розв'язних задач. Розглянемо виділення підкласів розв'язних задач за структурою вхідних даних за умови, що складність їхнього розв'язання оцінюється за кількістю затрачених на знаходження глобального розв'язку операцій. Тобто для змодельованої цільової функції існує глобальний розв'язок, який збігається з метою дослідження. У літературі такі задачі називають розв'язними випадками. Задання вхідних даних функціями натурального аргументу дає змогу вводити термін підкласи розв'язних задач.

Означення 1. Розв'язними назвемо підкласи задач із різних класів задач комбінаторної оптимізації з певною структурою вхідної інформації, для яких відомо спосіб аналітичного знаходження глобального розв'язку.

Означення 2. Назвемо розв'язну задачу індивідуальною, якщо для неї завдяки спеціальній структурі вхідних даних, змодельованих комбінаторною та числовою функціями, і у разі заданого значення n аналітичний розв'язок є відомим.

Означення 3. Підкласом розв'язних задач назвемо множину індивідуальних розв'язних задач зі спеціальною структурою вхідних даних, змодельованими комбінаторною та числовою функціями одного і того ж класу, для яких наявні аналітичні розв'язки зводяться до одного виразу за будь-якого значення n .

Означення 4. Підмножиною розв'язних задач з певного класу задач комбінаторної оптимізації назвемо підкласи розв'язних задач, заданих комбінаторною та числовою функціями різних класів за довільного значення n .

Підкласи розв'язних задач виділяємо за такими ознаками:

- а) за структурою вхідних даних;
- б) за вибраною мірою подібності;
- в) за структурою аргументу.

Підкласи розв'язних задач виділяють з урахуванням способу оцінювання складності їхнього розв'язання.

Використання описаного методу моделювання структури вхідних даних дає змогу спростити розпізнавання підкласів розв'язних задач для багатьох класів NP -повних задач. Він дає змогу знаходити їх для задач комівояжера, розміщення, призначення, для задачі кластеризації з регулярною структурою вхідних даних (функції натурального аргументу змінюються як періодичні, монотонні, опуклі унімодальні, вгнуті унімодальні тощо).

УПОРЯДКУВАННЯ МНОЖИНИ КОМБІНАТОРНИХ КОНФІГУРАЦІЙ ПІДМНОЖИНАМИ

Закономірність зміни значень цільової функції в задачах комбінаторної оптимізації залежить від упорядкування комбінаторних конфігурацій (аргументу) $w \in W$, від структури вхідних даних, а в кластеризації — і від типів розбиття n -елементної множини на підмножини. На підмножині ізоморфних комбінаторних конфігурацій вона змінюється так, як і для задач, аргументом яких є перестановка (ізоморфні комбінаторні конфігурації містять однакову кількість елементів або блоків). Для знаходження аргументу опишемо спосіб упорядкування комбінаторних конфігурацій підмножинами, який не залежить від структури вхідних даних певної задачі. Цей підхід орієнтовано на широкий клас задач і не обмежується розв'язними випадками.

З виразу (1) видно, що для фіксованого аргументу послідовність величин добутку значень числової та комбінаторної функцій є комбінаціями елементів заданої матриці. Якщо одна з них — бінарна послідовність, то з матриці вибираються не всі елементи. Цю послідовність назовемо *варіантом розв'язку задач*, тобто варіант розв'язку задачі — це послідовність величин добутку значень числової і комбінаторної функцій (вираз (1)). За способом утворення множина цих варіантів розділяється на підмножини. До першої підмножини належать послідовності, значення яких вибрано з матриці, починаючи з елемента за адресою 1, до другої підмножини — починаючи з адреси 2 і далі. Кількість таких підмножин для різних класів задач є різною. Відповідно упорядковується і множина комбінаторних конфігурацій. Утворені підмножини складаються з менших підмножин. Таке розбиття множини комбінаторних конфігурацій можна виконувати за двома, трьома і більше значеннями цієї послідовності і воно не залежить від вхідних даних. Множину перестановок (підмножин ізоморфних комбінаторних конфігурацій) упорядкуємо підмножинами $K_1, K_2, \dots, K_{\tilde{q}}$, для яких варіанти розв'язку задачі містять елементи матриці C , починаючи відповідно з адреси 1, 2, ..., \tilde{q} , де \tilde{q} — кількість таких підмножин. Для заданого упорядкування одержаних підмножин для певної структури вхідних даних встановлюється закономірність зміни значень цільової функції. Такий підхід зменшує залежність результату розв'язку задач від вхідних даних і дає змогу, ураховуючи їхню структуру, знаходити ті підмножини, які містять глобальний розв'язок.

Знаючи правила утворення варіантів розв'язку задачі, для регулярної структури вхідних даних (розглянуто функції натурального аргументу, які змінюються як лінійні, монотонні, періодичні з різними довжинами періодів), для задачі комівояжера, задачі розміщення, задачі про призначення,

кластеризації знайдено глобальний розв'язок і встановлено закономірність зміни значень цільової функції для певного впорядкування. Цей аналіз великих труднощів не створює, до того ж досить просто довести, що знайдений варіант розв'язку є оптимальним. Використовуючи означені властивості задач комбінаторної оптимізації, нескладно виділяти підкласи розв'язних задач, для яких цільова функція змінюється однаково. Наприклад, у задачі комівояжера для лінійних, монотонних, опуклих, вгнутих функцій на заданому впорядкуванні перестановок цільова функція змінюється як кусково-монотонна.

Знаходження підкласів розв'язних задач виконуємо за такою схемою.

1. Розробимо стратегію розбиття множини комбінаторних конфігурацій з використанням параметрів, незалежних від вхідних даних. З цією метою для задач про призначення, розміщення, комівояжера, кластеризації уведемо правила утворення варіантів розв'язку задачі з елементів матриць, якими задано вхідні дані. Упорядкуємо отримані підмножини.

2. Виділимо підкласи задач, які задаються функціями натурального аргументу з регулярною структурою (лінійні, періодичні, монотонні та інші).

3. Доведемо, що виділені підкласи задач з класів задач комівояжера, задачі про призначення, задачі розміщення, є розв'язними, знайдемо для них глобальний розв'язок і визначимо підмножини, які містять цей розв'язок.

ПІДКЛАСИ РОЗВ'ЯЗНИХ ЗАДАЧ КОМБІНАТОРНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ, АРГУМЕНТОМ ЦІЛЬОВОЇ ФУНКЦІЇ В ЯКИХ Є ПЕРЕСТАНОВКА

Описання вхідних даних функціями натурального аргументу (лінійними, майже періодичними, вгнутими, опуклими) дає змогу суттєво розширювати підкласи розв'язних задач різних класів.

Наведемо такі теореми, доведення яких викладено в [1]. Закономірність зміни комбінаторної функції завжди задана для першої перестановки $w^1 \in W$ у їхній множині. Цільова функція у цих задачах є дискретною та багатоекстремальною.

Знаючи правила утворення варіантів розв'язку задачі, для різної структури вхідних даних (числова і комбінаторна функції змінюються як лінійні, монотонні, періодичні з різними довжинами періодів) для задач комівояжера, розміщення, задачі про призначення, кластеризації знайдено аргумент (перестановку або розбиття n -елементної множини на підмножини), для якого цільова функція набуває глобального значення, а також визначено підмножини знаходження цього аргументу.

- Якщо в класичній задачі про призначення вхідні дані задано функцією

$$\varphi(j + 2n) = \varphi(j),$$

$$\text{а для } 1 \leq j \leq n \quad \varphi(j) = |j - n| - n + e$$

$$\text{і для } (n + 1) \leq j \leq 2n \quad \varphi(j) = |j - n| - (n + 1) + e, \quad j = \overline{1, n^2}, \quad e \in R,$$

то аргумент, для якого цільова функція набуває найменшого значення, знаходиться в кожній з перших $\lfloor n/2 \rfloor$ підмножин K_s , а для найбільшого — в кожній з $\lfloor n/2 \rfloor + 1, \dots, n$ підмножин K_t .

- Якщо функція натурального аргументу в задачі розміщення одногобаритних модулів змінюється як монотонно неспадна, то для цього ж упорядкування перестановок цільова функція змінюється як кусково-монотонно незростаюча. Якщо вона змінюється як монотонно незростаюча, то цільова функція змінюється як кусково-монотонно неспадна.

Означення 5. Назвемо прямою та оберненою функціями такі, які симетричні відносно лінії, паралельній осі абсцис або осі ординат. Якщо ці функції монотонні або лінійні то паралельна лінія проходить через точку їхнього перетину.

- Якщо в задачі комівояжера вхідні дані задано прямою монотонно незростаючою функцією натурального аргументу, то значення цільової функції $F(w^k)$ на заданому упорядкуванні перестановок підмножинами K_1, K_2, \dots, K_{n-2} змінюється як кусково-монотонно неспадна функція.

- Якщо в задачі комівояжера вхідні дані задано монотонно-неспадною функцією натурального аргументу, оберненою до заданої прямої, то значення цільової функції $F(w^k)$ на цьому ж упорядкуванні перестановок змінюється як кусково-монотонно незростаюча функція.

В задачі кластеризації закономірність зміни значень цільової функції залежить від упорядкування аргументу, від структури вхідних даних та від типів розбиття n -елементної множини на підмножини [7].

Виділимо підкласи розв'язних задач для кластеризації, в якій аргументом цільової функції є розбиття n -елементної множини на підмножини.

- Якщо числова функція є дискретною лінійною неспадною або незростаючою, то найбільше значення цільової функції знаходиться у першій підмножині. Якщо вона змінюється як вгнута унімодальна функція, то найбільше значення цільової функції знаходиться в останній підмножині. Якщо $\varphi(j)'''$ змінюється як опукла унімодальна функція, то найбільше значення цільової функції знаходиться у першій підмножині.

ВИДІЛЕННЯ ПІДКЛАСІВ РОЗВ'ЯЗНИХ ЗАДАЧ У ШТУЧНОМУ ІНТЕЛЕКТІ

У сфері штучного інтелекту є роботи з виділення підкласів розв'язних задач за структурою вхідної інформації у розпізнаванні образів та розпізнаванні мовлення, наприклад [8, 9]. У задачах із чіткими вхідними даними кінцева мета, як правило, збігається з результатами, одержаними за змодельованою цільовою функцією. У задачах з нечіткою вхідною інформацією, яка має місце у штучному інтелекті, одержані за змодельованою цільовою функцією результати не завжди відповідають меті дослідження. Це пов'язано з тим, що для знаходження оптимального розв'язку необхідно вводити міру подібності між елементами, яка є суб'єктивною оцінкою. До того ж, в деяких задачах (кластеризація, задача клінічної діагностики тощо) необхідно вводити кілька цільових функцій.

Позначимо як $u^+(a, \tilde{a}) = 1$ міру подібності, за допомогою якої отримуємо глобальний розв'язок, де a — заданий об'єкт, який порівнюється з

еталоном \tilde{a} . Якщо $u^-(a, \tilde{a}) = 0$, то за вибраною мірою подібності не знаходимо жодного розв'язку. Якщо $u(a, \tilde{a}) \in \{\delta, \dots, 1\}$, то вибрана міра подібності дає можливість знайти допустимий розв'язок, де δ — найменша величина міри подібності, для якої існує допустимий розв'язок. Отже, якщо для певної задачі $u^+(a, \tilde{a}) = 1$, то вона є розв'язною за ознакою подібності.

Розглянемо виділення підкласів розв'язних задач за певною мірою подібності на прикладі задачі клінічної діагностики [10]. Позначимо $A = \{a_1, \dots, a_n\}$ множину захворювань, описання яких знаходиться в бібліотеці і яку надалі називатимемо множиною еталонів, де елемент $a_t, t \in \{1, \dots, n\}$, відповідає певному захворюванню, якому поставлено у відповідність характерні ознаки. Позначимо ознаки t -го захворювання упорядкованою множиною $V^{(t)} = (v_1^{(t)}, v_2^{(t)}, \dots, v_{q_t}^{(t)})$, де q_t^* — кількість ознак t -го захворювання. Вхідною інформацією в задачі клінічної діагностики є множина ознак $\tilde{V} = (\tilde{v}_1, \tilde{v}_2, \dots, \tilde{v}_{q^{**}})$ (q^{**} — їхня кількість), яка описує одне або кілька захворювань. Позначимо їх $B = \{b_1, \dots, b_{\tilde{n}}\}$, де $b_{\tilde{n}}$ — захворювання, яке потрібно визначити, \tilde{n} — кількість можливих захворювань, а $q_t^* \neq q^{**}$ або $q_t^* = q^*$. Ознаки $\tilde{v}_r \in \tilde{V}$ вхідної інформації мають той же зміст, що й описані в еталоні ознаки $v_s^{(t)} \in V^{(t)}$, $r \in \{1, \dots, q^{**}\}$, $s \in \{1, \dots, q_t^*\}$. Назвемо однотипними такі ознаки, які характеризують один і той саме параметр в еталоні і у вхідних даних, наприклад значення температури, тиску, пульсу тощо.

Задача полягає у знаходженні для B з множини ознак \tilde{V} найбільш правдоподібного одного або кількох еталонів з множини $A = \{a_1, \dots, a_n\}$, тобто за вхідними ознаками установлюється одне або кілька захворювань b . Ознаки в цій задачі відіграють роль критеріїв, за якими оцінюється її розв'язок.

Позначимо як $u_l(v_s^{(t)}, \tilde{v}_r)$ елементарну міру подібності між елементами множин \tilde{V} і $V^{(t)}$. Задача клінічної діагностики належить до задачі семантики, де необхідно визначати суть заданих об'єктів. Під час їхнього розпізнавання виникає нечіткість у вхідних даних. Тому покладемо, що міри подібності $u_l(v_s^{(t)}, \tilde{v}_r)$ набувають значень $\{0, \dots, 1\}$, $r \in \{1, \dots, q^{**}\}$, $s \in \{1, \dots, q_t^*\}$. Якщо для елементів $v_s^{(t)}$ та \tilde{v}_r $u_l(v_s^{(t)}, \tilde{v}_r) \in \{\delta, \dots, 1\}$, вважатимемо, що вони подібні, де δ — найменша величина міри подібності, для якої існує допустимий розв'язок. Якщо $u_l(v_s^{(t)}, \tilde{v}_r) = 1$, то задача в цьому разі є розв'язною. Елементи $v_s^{(t)}$, \tilde{v}_r , для яких $u_l(v_s^{(t)}, \tilde{v}_r) < \delta$, вважатимемо різними. Якщо множини $\tilde{V} \cap V^{(t)} = \emptyset$, то вони не містять жодних однакових елементів $v_s^{(t)}$ і \tilde{v}_r . Якщо $\tilde{V} \cap V^{(t)} \neq \emptyset$, то множини \tilde{V} і $V^{(t)}$ містять однакові елементи, один і

більше. Вираз $u_l(v_s^{(t)}, \tilde{v}_r)$ є елементарною мірою подібності. Їхнє сумарне значення утворює інтегральну міру подібності і є цільовою функцією, за якою оцінюють результат. Оскільки на етапі порівняння вхідних даних і еталону критерієм є подібність між заданими елементами і еталонами, то вона є однокритеріальною.

Виникають такі ситуації:

1) якщо $q^{**} = q_t^*$ і для будь-якого $\tilde{v}_r \in \tilde{V}$ існує в $V^{(t)}$ однаковий елемент $v_s^{(t)}$, $r = 1, q^{**}$, $s \in \{1, \dots, q_t^*\}$, а в бібліотеці немає іншого аналогічного еталону, то задача клінічної діагностики є розв'язною;

2) якщо $q^{**} \leq q_t^*$ і для будь-якого $\tilde{v}_r \in \tilde{V}$ в $V^{(t)}$ існує однаковий елемент $v_s^{(t)}$, а в бібліотеці знаходяться еталони, для яких значення цільової функції є однаковими, тоді підчас розв'язання задачі клінічної діагностики виникає ситуація невизначеності, яку необхідно розв'язувати диференціальним діагнозом з урахуванням додаткових критеріїв;

3) якщо $q^{**} > q_t^*$, то вхідні дані описують кілька захворювань або вони містять дані, відсутні у бібліотеці; у цьому разі необхідно забезпечити автоматичне внесення нової інформації, тобто на етапі розроблення програм необхідно забезпечити процес самонавчання системи.

Як видно з постановки задачі перебору еталонів, пошук еталону, подібного до вхідного \tilde{V} , потребує повного перебору. Цю задачу можна звести до розв'язної шляхом структуризації бібліотеки еталонів за певними ознаками, наприклад за типом захворювання. Кожне захворювання має бути описано множиною ознак, які задають клінічні форми і стадії. Окремо варто виділити захворювання, які характеризуються однаковими ознаками, а також визначити однакові для групи захворювань ознаки, що дасть змогу звужувати область оптимального пошуку.

Задача розпізнавання мовлення — це процес автоматичного оброблення мовленнєвого сигналу з метою визначення послідовності слів, яка передається цим сигналом [11]. Якщо змодельовати цю задачу як задачу комбінаторної оптимізації, то можна побачити, що аргумент цільової функції в ній залежить від кількох змінних, якими є комбінаторні конфігурації різних типів, а сам мовленнєвий сигнал є розміщенням з повтореннями. З класів нерозв'язних у цій задачі виділяємо підкласи розв'язних задач за такими ознаками: а) за вибраною мірою подібності; б) за структурою вхідних даних.

Складність розв'язання означеної задачі полягає в тому, що сигнали, які відповідають одному і тому саме слову, промовленому багато разів одним і тим саме диктором або різними дикторами, відрізняються між собою. Таких різних варіантів може бути нескінченна кількість тому, що елементи звуку — фонemi, утворюються комбінацією елементів мовленнєвого тракту і утворюють комбінаторну конфігурацію — розміщення з повтореннями. Множина цієї комбінаторної конфігурації є нескінченною, а підмножина ізоморфних розміщень з повтореннями — скінченною. Тому має місце нечіткість вхідних

даних. Якщо підмножини фонем утворено комбінацією різних елементів мовленнєвого тракту і вони не перетинаються, то для них існує міра подібності, яка дає змогу визначити глобальний розв'язок, тобто варіанти розв'язку для вимовлених різних звуків (слів) є різними. В цьому разі задача є розв'язною як за мірою подібності, так і за структурою вхідного сигналу. Вважатимемо, що такі фонемні складають підкласи розв'язних задач у розпізнаванні мовленнєвих сигналів. Якщо підмножини фонем утворено комбінацією як однакових, так і різних елементів мовленнєвого тракту, і вони перетинаються, то для них за вибраною мірою подібності можна одержати неоднозначний результат, тобто у розпізнаванні різних звуків (слів) варіанти розв'язку задачі можуть бути однаковими, внаслідок чого виникає ситуація невизначеності.

Оберненою до задачі розпізнавання є задача синтезу мовленнєвих сигналів, яка полягає у відтворенні мовлення за заданим текстом. Зазвичай, для розв'язання цієї задачі формують бібліотеку фрагментів природних мовленнєвих сигналів або такі фрагменти створюють штучно. Штучне мовлення синтезують шляхом об'єднання вибраних з бібліотеки ділянок сигналу природної мови у фонемні, які відповідають заданим звукам (відповідно до букв заданого тексту) з використанням певних правил. Граматичні правила можна розглядати як міри подібності. Оскільки їх розроблено ґрунтовно, а людина сприймає широкий діапазон мовлення, то за відсутності умови відтворення індивідуальності голосу ця задача є розв'язною за мірою подібності. Особливості жіночого, чоловічого або дитячого голосів залежать від частоти основного тону, амплітуди сигналу, тому ця задача у разі накладання певних обмежень є розв'язною за мірою подібності.

Задача пошуку у бібліотеці еталонних сигналів такого мовленнєвого сигналу, який відповідає певному слову, з використанням повного перебору є NP -повна. Але вона стає поліноміально розв'язною, якщо за певними ознаками проведено структуризацію цієї бібліотеки.

СТРУКТУРИЗАЦІЯ БІБЛІОТЕКИ ЕТАЛОННИХ СИГНАЛІВ

Упорядкуємо еталонні сигнали, що відповідають заданим словам, в алфавітному порядку за такою схемою.

1. З кожного бібліотечного сигналу виділимо сегмент постійної довжини λ , який є початком сигналу еталонного слова, так, щоб він відповідав частині першої фонемі. Множину одержаних сегментів позначимо $A = \{a_1, \dots, a_n\}$, а множину слів у словнику позначимо $B = \{b_1, \dots, b_n\}$. Елементу $a_i \in A$ відповідає сегмент частини першої фонемі слова, яке задається елементом b_i словника.

2. Розв'язавши задачу розбиття множини A на підмножини (кластеризацію), об'єднаємо однорідні сегменти в одну підмножину $\rho_s^k \subset \rho^k$. Підмножиною $\rho_s'^k \subset \rho'^k$ позначимо підмножину слів словника $B = \{b_1, \dots, b_n\}$ з подібними початковими сегментами, яка ізоморфна $\rho_s^k \subset \rho^k$, $s \in \{1, \dots, \eta^k\}$.

3. Кожній одержаній підмножині $\rho_s^k \subset \rho^k$ поставимо у відповідність еталон сегмента a'_j , який відповідає частині першої фонему слова, що входить до $\rho_s^k \subset \rho^k$. Одержану множину сегментів позначимо $A' = \{a'_1, \dots, a'_n\}$. Аналогічно можна структурувати бібліотеку еталонних сигналів за другою, третьою фонемами, використавши як еталони множину сегментів $A = \{a_1, \dots, a_n\}$.

Маючи еталони сегментів $a'_i \in A'$, упорядкованих за абеткою, для пошуку еталонного сигналу в бібліотеці вирізаємо сегмент вхідного сигналу X довжиною λ , що відповідає частині першої фонему. Порівняння цих сигналів проводимо з використанням відомих методів, наприклад, методу динамічного програмування [11]. При цьому порівнюється сегмент вхідного сигналу довжиною λ з еталонними сегментами $a'_i \in A'$ структурованої бібліотеки. Якщо значення заданої цільової функції є найбільшим для підмножини $\rho_s^k \subset \rho^k$, то пошук вхідного слова проводиться в цій підмножині словника B за другою, третьою і далі фонемами.

ВИСНОВКИ

Використання методу моделювання структури вхідних даних функціями натурального аргументу дає змогу зводити деякі нерозв'язні задачі комбінаторної оптимізації до розв'язних. Для останніх нескладно знаходити аргумент (комбінаторну конфігурацію), для якого цільова функція набуває глобальних мінімуму та максимуму, а також сформулювати вираз, за яким знаходиться її значення. Знайдені формули є табличними для різних структур вхідних даних в задачах комбінаторної оптимізації.

У розпізнаванні та синтезі мовленнєвих сигналів виділення підкласів розв'язних задач проводять як за ознакою подібності, так і за структурою вхідних даних. Якщо вибрані ознаки подібності для певних задач дають можливість поліноміально знайти глобальний розв'язок, то такий підклас задач є розв'язним. У задачах цього класу обчислювальна складність знаходження глобального розв'язку залежить не лише від розробленого алгоритму, а й від вибраної міри подібності.

Моделювання структури вхідних даних функціями натурального аргументу суттєво розширює підкласи розв'язних задач, дає змогу виділяти їх в окремі групи, для яких цільова функція змінюється однаково, а також визначати підкласи, до яких належать відомі розв'язні випадки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Тимофієва Н.К. Теоретико-числові методи розв'язання задач комбінаторної оптимізації. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. Рукопис. ІК ім. В.М. Глушкова НАН України, К. 2007. 374 с.

2. Kalmancon K. Edgeconvex circuits and the traveling salesman problem. *Canad. J. Math.* 1975. 27, № 5. P. 1000–1010.
3. Supnick F. Extreme Hamiltonian lines. *Annals of Math.* 1957. 66. P. 179–201.
4. Демиденко В.М. Специальный случай задачи о бродячем торговце. *Изв. Акад. Наук БССР, Сер физ.-мат. наук.* 1976. № 5. С. 28–32.
5. Monge G. Mémoire sur la théorie des déblais et des remblais. *Histoire de l'Académie Royale des Sciences, Année M. DCCLXXXI, avec les Mémoires de Mathématique et de Physique, pour la même Année, Tirés des Registres de cette Académie.* Paris, 1781. P. 666–704.
6. Тимофеева Н.К. Подклассы разрешимых задач из классов задач комбинаторной оптимизации. *Кибернетика и системный анализ.* 2009, № 2. С. 97–105.
7. Тимофеева Н.К. О некоторых свойствах разбиений множества на подмножества. *УСиМ.* № 5, 2002. С. 6–23.
8. Schlesinger M., Flach B. Some solvable subclasses of structural recognition problems *Czech Pattern Recognition Workshop 2000, Tomas Svoboda (ed.), Czech Pattern Recognition Society, Praha, February.* 2000, pp. 55–61.
9. Тимофієва Н.К. Про деякі особливості визначення підкласів розв'язних задач в розпізнаванні та синтезу мовних сигналів. *Доклади XV міжнародної конференції з автоматичного управління "Автоматика–2008"*, Збірка наукових праць у трьох томах. Т. 2, м. Одеса, 23–26 вересня 2008 року, Одеса, ОНМА, 2008. С. 937–940.
10. Тимофієва Н.К., Гриценко В.І. Аргумент цільової функції в задачі клінічної діагностики/ *УСиМ.* 2012. № 3. С. 3–14.
11. Винцюк Т.К. Анализ, распознавание и интерпретация речевых сигналов. К.: Наук. думка, 1987. 262 с.

Отримано 16.02.2022

REFERENCES

1. Tymofijeva N.K. Theoretical-Numerical Methods Used to Solve Combinatorial Optimization Problems. Manuscript. The dissertation for Doctor's Degree in Technical Sciences on Speciality 01.05.02 – Mathematical Modelling and Numerical Methods. V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of National Academy of Sciences of Ukraine, K., 2007. 374 P. (in Ukrainian)
2. Kalmancon K. Edgeconvex circuits and the traveling salesman problem. *Canad. J. Math.* 1975. 27, № 5. P. 1000–1010.
3. Supnick F. Extreme Hamiltonian lines. *Annals of Math.* 1957. 66. P. 179–201.
4. Demydenko V. M. A special case of the traveling salesman problem. *Izv. Acad. Nauk BSSR, Ser fiz.-mat. Science* . 1976. № 5. P. 28–32. (in Russian)
5. Monge G. Mémoire sur la théorie des déblais et des remblais. *Histoire de l'Académie Royale des Sciences, Année M. DCCLXXXI, avec les Mémoires de Mathématique et de Physique, pour la même Année, Tirés des Registres de cette Académie.* Paris, 1781. P. 666–704.
6. Timofeeva N.K. Subclasses of solvable problems from classes of combinatorial optimization problems. *Cybernetics and systems analysis.* 2009, № 2. P. 97–105. (in Russian)
7. Timofeeva N.K. On some properties of partitioning a set into subsets. *USiM.* № 5, 2002. P. 6–23. (in Russian)
8. Schlesinger M., Flach B. Some solvable subclasses of structural recognition problems *Czech Pattern Recognition Workshop 2000, Tomas Svoboda (ed.), Czech Pattern Recognition Society, Praha, February.* 2000. P. 55–61.
9. Tymofijeva N.K. On some features of the definition of subclasses of solvable problems in the recognition and synthesis of speech signals. *Reports of the XV International Conference on Automatic Control "Automation-2008", Collection of scientific papers in three volumes.* Vol. 2, Odessa, September 23 – 26, 2008, Odessa, ONMA, 2008. P. 937–940. (in Ukrainian)
10. Tymofijeva N.K., Gritsenko V.I. Argument of the objective function in the problem of clinical diagnosis. *USiM.* 2012. № 3 P. 3–14. (in Ukrainian)
11. Vintsyuk T.K. *Analysis, recognition and interpretation of speech signals.* K.: Nauk. dumka, 1987. 262 p. (in Russian)

Received 16.02.2022

Gritsenko V.I., Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Honorary Director of International Research and Training Center
for Information Technologies and Systems of National Academy of Sciences
of Ukraine and Ministry of Education and Science of Ukraine
ORCID: 0000-0003-4813-6153, e-mail: vig@irtc.org.ua
Tymofijeva N.K., DSc (Engineering), Senior Researcher,
Leading Researcher of the Department of Complex Research of Information Technologies
ORCID: 0000-0002-0312-1153, e-mail: tymnad@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,
40, Acad. Glushkov av., Kyiv, 03187, Ukraine

FINDING SUBCLASSES OF SOLVABLE PROBLEMS IN COMBINARARY OPTIMIZATION AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE BY STRUCTURE OF INPUT INFORMATION

Introduction. The literature for some classes of combinatorial optimization problems describes subclasses that have a certain structure of input data with a clear nature, for which there is a known method of analytical finding of a global solution without searching for options. These subclasses of problems are called solvable. They can be used to reduce unsolvable combinatorial optimization problems to solvable ones.

The purpose of the paper. The following main approaches have been identified for solving combinatorial optimization problems: a) methods and algorithms based on partial search of variants; b) methods and algorithms based on recognizing the structure of input information. The second approach includes work on finding subclasses of solvable problems and development of recognition algorithms according to these subclasses of the structure of input information. The problem is to identify subclasses for different classes of combinatorial optimization problems according to the structure of input data, for which according to the developed rules analytically find a global solution

Methods. To select subclasses of solvable problems, we use the method of modeling input data by functions of a natural argument. To do this, the input data, which are given by finite sequences, are given by the functions of the natural argument, one of which is combinatorial. For various such functions, which are represented by linear, periodic, convex, the global values of the objective function are determined, both maximum and minimum.

Results. Subclasses of solvable problems are distinguished for different classes of combinatorial optimization and artificial intelligence problems according to the structure of input data. Found global maximum and minimum for assignment problems, traveling salesman problem, placement of objects on a given surface.

Conclusions. Using the method of modeling the structure of input data by means of natural argument functions allows to reduce some unsolvable problems of combinatorial optimization to solvable ones. For the latter, it is easy to find an argument (combinatorial configuration) for which the objective function acquires a global minimum and maximum, as well as to formulate the expression behind which is its value. In artificial intelligence problems, the subclasses of solvable problems are distinguished both on the basis of similarity and the structure of the input data. Using them allows you to reduce unsolvable problems to solvable ones.

Keywords: subclasses of solvable problems, natural argument function, combinatorial optimization, similarity measures, objective function.

DOI: <https://doi.org/>

УДК: 004.043 CC BY-NC

БАБАК О.В., канд. техн. наук,
старш. наук. співроб., відд. екологічних цифрових систем
ORCID: 0000-0002-7451-3314, e-mail: dep115@irtc.org.ua
СУРОВЦЕВ І.В., д-р техн. наук, старш. наук. співроб.,
зав. відд. екологічних цифрових систем
ORCID: 0000-0003-1133-6207, e-mail: igorsur52@gmail.com
Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій
та систем НАН України та МОН України,
пр. Акад. Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна

РЕДУКЦІЯ ДАНИХ ЯК МЕТОД ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Вступ. Принципи теорії редукції у вигляді методів виявлення прихованих закономірностей у даних, підходів до перетворення систем координат та зниження розмірності вхідної інформації широко використовують в задачах ідентифікації та класифікації об'єктів, пошуку аномальних тенденцій у фінансовій діяльності, технічних системах вимірювання фізичних та хімічних параметрів.

Мета статті — огляд теоретичних та практичних результатів застосування теорії редукції в задачах і системах оброблення даних.

Методи. Розроблено методи виявлення прихованих закономірностей у даних, класифікації об'єктів за допомогою альфа-процедури, когнітивного моделювання екологічних даних, частотно-часової цифрової фільтрації, перетворення та моделювання багатокomпонентних сигналів, вимірювання концентрацій хімічних речовин в об'єктах довкілля та вмісту парникових газів в земній атмосфері, визначення навантажень на осі автомобіля за сигналом динамічного зважування, оцінювання витрат пилувугільного палива для економії коксу та природного газу доменної печі.

Результати. Розроблено принципи теорії редукції, високочутливу аналітичну систему «Аналізатор ІХП» вимірювання концентрацій 20 хімічних речовин у питній воді, харчових продуктах та навколишньому середовищі з використанням трьох нових імпульсних методів хронопотенціометрії для електрохімічного аналізу, інформаційну технологію «Атмосферні гази» визначення концентрацій 38 газів у земній атмосфері, комп'ютерні системи динамічного зважування автомобіля для митного вагового контролю транспортних засобів.

Висновки. Для класу задач з монотонними інтегральними даними вимірювання є необхідним перетворення системи координат, що дає змогу розглянути багатокomпонентний сигнал як суму окремих компонентів. Використання методів теорії редукції уможливило розроблення інтелектуальних інформаційних технологій екологічного моніторингу об'єктів біосфери, ефективних технічних систем вимірювання фізичних параметрів, виявлення шахрайських транзакцій у банківській системі.

Ключові слова: теорія редукції, приховані закономірності, класифікація об'єктів, перетворення системи координат, частотно-часова фільтрація, визначення концентрації.

ВСТУП

Вперше достатньо обґрунтовану логіко-методологічну концепцію стосовно побудови теорії редукції запропонували в 1950-х роках прихильниками логічного емпіризму (Нагель Е., Фейгл Г. та ін.). Редукція (reduction — відсунення назад або повернення до колишнього стану) — логіко-методологічна процедура уявлення складного об'єкта як суми простих елементів, що робить його доступним для аналізу. Принцип редукції цілому є зведенням складного до простого, вищого до нижчого (початкового), цілого до властивостей частин та частин до специфіки цілого [1].

У науці процес редукції розглядають як метод перетворення даних, пов'язаний з розв'язанням того чи іншого наукового завдання з метою її спрощення. Тому він є невід'ємною частиною основних методів наукового пізнання: ідеалізації, абстракції та моделювання. Особливе значення редукція інформації набуває у вирішенні проблеми великих даних.

На наш погляд, реалізація принципів редукції може сприяти створенню ефективних інтелектуальних інформаційних технологій екологічного моніторингу, в якому до позитивних факторів належать результати вимірювання концентрацій хімічних речовин та атмосферних газів. Розроблення технологій, в яких результати одержують на малих вибірках даних, коли відношення обсягу вибірки до кількості факторів менше за десять, є актуальною науково-технічною проблемою.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Будемо виходити з того, що рішенням задачі класифікації образів, ідентифікації об'єктів і непрямих вимірювань фізико-хімічних параметрів є відновлення наявної залежності [2]. При цьому результати таких вимірювань звичайно входять до факторів перших двох задач.

Нехай досліджуваний об'єкт характеризується деякою випадковою вибіркою даних, одержаних у результаті пасивного експерименту

$$\{x_{ij}, y_i\} \quad i = \overline{1, l} \quad j = \overline{1, n} \quad \forall x_{ij} \neq 0, \quad (1)$$

де x_{ij} — фактори, y_i — спостереження, l — кількість спостережень, n — кількість факторів.

Якщо під час ідентифікації y_i є натуральними числами, то внаслідок класифікації отримуємо $y = (+1, -1)$. Рішення вказаної задачі будемо шукати у вигляді множинної лінійної регресії

$$y = a_0 + \sum_{j=1}^n a_j x_j, \quad (2)$$

де a_0, a_j — оцінки коефіцієнтів.

У всіх випадках розв'язок задачі, тобто визначення вектору оцінки коефіцієнтів моделі a , будемо шукати як розв'язання оптимізаційної задачі

$$a = \arg \min_a \left(\sum_{i=1}^l (a_i x + a_0 - y_i)^2 \right). \quad (3)$$

Водночас намагання за даними одержати оптимальне наближення до точного опису об'єкта нерозривно пов'язано зі зменшенням тим чи іншим способом неповноти знань про цей об'єкт, отже, завжди зі зниженням розмірності початкової задачі n до значення n' одержимо $n' < n$, тобто, в якомусь розумінні редукцію вхідної інформації. Вказану процедуру будемо називати виявленням прихованих закономірностей у вхідних даних.

Потрібно за даними (1) встановити приховані фактори розмірністю n' та вирішити оптимізаційну задачу (2), тобто знайти вектор a' оцінки коефіцієнтів моделі прихованої закономірності.

Мета роботи. З врахуванням особливостей вирішення проблеми редукції даних, привести у стислому вигляді одержані авторами найвагоміші результати щодо розв'язання задач класифікації та ідентифікації об'єктів, а також у разі непрямих вимірювань. Показати, що ці результати можуть бути використані у процесі інтелектуалізації інформаційних технологій для практичного застосування.

ОСОБЛИВОСТІ ПРОБЛЕМИ РЕДУКЦІЇ ДАНИХ

Одразу відмітимо, що принцип редукції у моделюванні лежить в основі аналізу даних. Для вирішення задачі виявлення закономірностей майже завжди виникає зайвий клопіт, пов'язаний з наявною мультиколінійністю факторів, тобто їх кореляцією, яка обтяжує аналіз оцінки загального результату. У цьому випадку регресійна модель стає непридатною для прогнозування.

Редукцію даних (Data reduction) використовують у двох різних за змістом задачах: зменшення розмірності або обсягу даних. Або інакше, зведення даних зі складною незручною формою до простішої форми їхнього подання.

У першому випадку основним методом зменшення розмірності даних x_j є факторний аналіз та виділення основних компонент. Сутність факторного аналізу полягає у поданні вхідних факторів $x_j, j = \overline{1, n}$ як деяку сукупність латентних факторів $x'_j, j = \overline{1, n'}$, де $n' < n$.

У результаті формується оптимальний простір нових ортогональних (взаємно некорельованих) змінних без істотних втрат змістовної інформації вхідних даних. При цьому, в основу методу головних компонент покладено, що фактори x є лінійною комбінацією вхідних показників x'

$$x_j = \sum_{k=1}^{n'} a_{kj} x'_{kj},$$

де x' — головні компоненти, a_{kj} — факторні навантаження.

Отже, по суті вирішується задача усунення мультиколінійності факторів у вхідній виборці X , коли $\det(x^T x) \approx 0$.

Не зупиняючись детально на виділенні головних компонентів, відзначимо, що всеж є деяка втрата змістовної інформації. Цей недолік повністю усувається, якщо є можливість ортогонального планування експерименту [3]. На жаль, останнє для більшості випадків одержання початкових даних є практично недосяжним і може бути здійснено тільки на евристичній основі.

У другому випадку поширеним є метод переведення результатів вимірювання з одної системи відліку в іншу. При цьому у новій системі може підвищитись точність відліку або скоротитись обсяг даних.

Цілком очевидно, що перший та другий випадок редукції даних методологічно є перетворенням багатомірної системи координат, завдяки якому можливо зменшення розмірності простору або змінення координатних осей, а це може привести до економії обчислювальних ресурсів та підвищення якості моделювання. Більше того, ефективно досягається головна мета комп'ютерного оброблення експериментальних та статистичних даних — машинне навчання (Machine Learning), яке полягає в автоматичному виявленні прихованих закономірностей. Ці закономірності та здобуті з них знання про об'єкт дають змогу зрозуміти сутність процесу і за наявними даними передбачити нові факти та одержати нові знання [4].

Інакше кажучи, у першому випадку розв'язуванню задачі моделювання повинна передувати редукція інформації. Для цього у початковому просторі великої розмірності n задачу синтезу моделі заміняють на задачу синтезу простору малої розмірності n' , в якому цю задачу розв'язують як просту, найчастіше лінійну функцію (2).

Якщо редукція полягає у зміні координатних осей, то звичайним розв'язком є зворотна функція, тобто

$$y = f(x) \rightarrow x = \varphi(y). \quad (4)$$

Такий підхід лежить в основі розв'язування цілого ряду задач непрямих вимірювань.

ЗАДАЧА КЛАСИФІКАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ

Різновидом реалізації принципу редукції у розв'язуванні задачі класифікації об'єктів у проблемі розпізнавання образів є запропонована Васильєвим В.І. альфа-процедура [5, 6]. Не вдаючись до подробиць, розглянемо тільки ідею реалізації цієї процедури.

Нехай задано навчальну вибірку ознак $P_j, j = \overline{1, n}$ обсягом l об'єктів і в ній образи V_1 та V_2 . Спочатку здійснюється попередній відбір і залишаються для подальшого оброблення тільки $m \leq n$ ознак P_j , для яких можна знайти два граничних значення x_{1j} та x_{2j} , що розділяють вісь значень P_j на два сегмента V_1, V_2 та сегмент їхнього перетинання.

Вводиться поняття розродільної сили для окремої ознаки як $F(P_j) = w_j / l$, де w_j — кількість об'єктів, розташованих зовні сегменту перетинання ознак P_j .

Алгоритм синтезу оптимального простору m' полягає у тому, що крок за кроком вибираються ознаки, які мають найкращу розродільну силу. Кожна нова ознака редукує сегмент перетинання та збільшує кількість правильно класифікованих об'єктів. Застосовується таке визначення розродільної сили ознак на k -му кроці селекції:

$$F(P_{jk}) = \frac{w_k - w_{k-1}}{l} = \frac{\Delta w_k}{l},$$

де w_{k-1} — кількість правильно класифікованих об'єктів перед вибором k -ої ознаки, w_k — кількість правильно класифікованих об'єктів після вибору k -ої ознаки.

На першому кроці селекції вибирається ознака з найкращою розродільною силою як базова ознака f_0 і надається разом з її числовими значеннями для усіх об'єктів як вісь.

Наступним кроком до системи координат додається друга ознака p_k і визначаються об'єкти на площині з осями f_0 та p_k . Далі у цій площині формується нова вісь, яка обертається навколо початку системи координат на величину кута альфа доти, поки проекції об'єктів на неї не дадуть найкращого поділу.

Ця процедура повторюється для усіх ознак, що залишились, і з них вибирається та, що дає найкращий поділ на відповідній осі f_1 , яка у подальшому застосовується як наступна штучна ознака.

На третьому кроці додається наступна ознака p_j як третя вісь, визначаються позиції усіх об'єктів на площині з осями f_1, p_j та шляхом обертання вибирається вісь f_2 з найкращим поділом об'єктів. Цей процес повторюється до повного поділу об'єктів у просторі m' . Площину, яка є перпендикулярною останньому базовому напрямку f_j та проходить через оптимальну її межу, приймають як вирішувальне правило. Якщо поділ не досягнуто, то для зупинки процесу застосовують спеціальний критерій [7].

Отже, розглянутий алгоритм альфа-процедури послідовно перетворює початкову систему координат, завдяки чому усувається мультиколінійність ознак у просторі m' . При цьому досягається висока точність виявлення прихованих закономірностей у даних, що підтверджується чисельними комп'ютерними експериментами. Такий підхід можна порівняти з широко відомим методом опорних векторів Вапника В.Н. [8]. Одну особливість застосування запропонованого підходу розглянуто у [9].

Застосування альфа-процедури дало змогу розв'язати задачу класифікації об'єктів — виявлення підприємств або банків банкрутів, що високо оцінено Податковою службою України.

ЗАДАЧА ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ

Як вже було вказано, усунення мультиколінійності факторів x є найважливою умовою виявлення закономірностей прихованих у даних. При цьому оцінки коефіцієнтів моделі (1) стають стійкими та усувається можливість застосування для них неправильного знаку.

Методи усунення мультиколінійності передбачають попереднє центрування вхідних даних, яке полягає у тому, що для кожного значення обчислюється середня величина в колонці даних:

$$x'_j = x_j - \bar{x}_j, j = \overline{1, n}.$$

Цей простий прийом дає достатньо хороші результати, оскільки надає можливість побудувати гіперповерхні умов методу найменших квадратів (МНК) таким чином, що кути між ними будуть перпендикулярними. У разі однорідних даних можна вважати, що вони стають наче ортогональними один одному.

Це є першим кроком алгоритму виявлення закономірностей.

Другий крок полягає у відновленні залежності (2) за вхідного значення n . Отже, стають відомими коефіцієнти моделі a_j , які є оцінками складників градієнта лінійної функції (2). За аналогією з алгоритмом розв'язання задачі класифікації, вводиться поняття сили впливу значень коефіцієнтів $F(x_j)$ на залежну змінну у [10].

На третьому кроці здійснюється ранжування за значенням коефіцієнтів a_j :

$$|a_{z1}| > |a_{z2}| > \dots > |a_{zn}|, z \in \overline{1, \dots, n}, \quad (5)$$

та одержання відповідного ряду x_j коефіцієнтів $F(x_j)$:

$$x_{z1}, x_{z2}, \dots, x_{zn}, z \in 1, \dots, n.$$

Четвертий крок полягає у використанні стратегії відбору позиції пошукової моделі регресії у новому просторі $n' \leq n$ (3) за деяким визначеним критерієм, наприклад, значенням залишкової суми квадратів (RSS) [11]:

$$y = a_0 + a_1 x_{z1};$$

$$y = a_0 + a_1 x_{z1} + a_2 x_{z2};$$

...

В окремих випадках четвертий крок може бути обмежено тільки початковими позиціями, наприклад, значенням $z = 2$. Таке виникає, якщо попередній аналіз (5) показав, що, наприклад, перші два значення оцінок коефіцієнтів a_z значною мірою перевищують значення інших. Подібна ситуація виникла під час створення моделі непрямих вимірювань витрат пилоугільного палива (ПВП), що вдувається у фурми доменної печі. Проведені дослідження показали, що тільки два фактори з шести: витрата транспортного повітря та перепад тиску на пилопровідах, є головними, а іншими можна знехтувати. Це дало змогу розробити та впровадити відповідну систему непрямих вимірювань ПВП, яка сприяла істотній економії коксу та природного газу [11, 13].

ЗАДАЧІ НЕПРЯМИХ ВИМІРЮВАНЬ

Серед безлічі непрямих вимірювань фізико-хімічних величин розглянемо клас задач, який в якості корисних (фільтрованих) початкових даних $y_0(t)$ використовує монотонні зростаючі (спадаючі) значення вимірювання багатокomпонентного процесу. Цей клас задач цікавий тим, що перед побудовою моделей процесу застосовується редукція даних, яка полягає у зміні координатних осей з використанням зворотної функції (4). До цього класу задач можна віднести: визначення концентрацій токсичних речовин в об'єктах довкілля електрохімічними методами інверсійної хронопотенціометрії; визначення навантажень на осі автомобіля за сигналом динамічного зважування під час заїзду транспортного засобу на платформу статичних ваг; визначення маси компонентів у разі неперервного дозування бетонних сумішів або комбікормів та інші задачі. Розглянемо алгоритм редукції даних для цього класу задач детальніше.

Перетворення системи координат дає змогу розглянути інтегральний сигнал $y(t)$, спотворений високочастотною завадою ξ : $y_0(t) = y(t) + \xi(t)$, як суму окремих компонентів $\varphi(y)$ у багатокomпонентному диференційному сигналі інтенсивності $\tau(y)$:

$$(t, y) \rightarrow (y, t) \rightarrow (y, dt / dy).$$

Надамо алгоритм редукції початкових даних для цього класу задач:

- відновлення корисного монотонного сигналу $y(t)$;
- формування значень перетвореного сигналу $t(y)$;
- диференціювання перетвореного сигналу $t(y)$ у сигнал інтенсивності $\tau(y) = dt / dy$;

- ідентифікація окремих компонентів $\varphi(y)$ у багатокомпонентному сигналі $\tau(y)$;
- визначення пошукових величин компонентів $\varphi(y)$.

Відновлення корисного монотонно зростаючого сигналу. Дослідження показали, що для таких вхідних даних застосування класичних методів фільтрації гармонічних сигналів не завжди ефективне, бо призводить до порушення форми та інтегральних характеристик у місцях різкої зміни кривизни сигналу, що впливає на точність визначення пошукових величин компонентів.

Одним зі шляхів вирішення проблеми відновлення негармонічних сигналів, спотворених високочастотними завадами, є використання методу частотно-часової фільтрації, ґрунтованого на використанні внутрішніх характеристик сигналу: точок екстремуму $y'(t) = 0$, перегину $y''(t) = 0$ та інтервалів часу між ними, які достатньо повно відображають властивості високочастотних перешкод у сигналі.

Метод частотно-часової фільтрації базується на використанні ідей способу визначення надшвидкого спектру аналогового сигналу, запропонованого Скуріхіним В.І., Цепковим Г.В., Пономарьовою І.Д. та ін. [15, 16].

Теоретичною основою методу є адаптивний базис, придатний для аналізу сигналів будь-якого класу, який не застосовує операцій множення. Адаптивність його досягається формуванням системи ортогональних базисних функцій за параметрами екстремумів самого сигналу $y(t)$. Приклади застосування методу частотно-часової фільтрації для відновлення вхідних сигналів визначення концентрацій токсичних речовин від високочастотних завад наведено у [17].

Формування значень перетвореного сигналу. Після виконання фільтрації високочастотних завад дані $y(t)$ стають корисним сигналом, що монотонно змінюється, з постійним кроком дискретизації за часом Δt .

Для формування значень перетвореного сигналу $t(y)$ задаємо крок дискретизації з амплітудою Δy , за допомогою лінійної інтерполяції або ермітових кубічних сплайнів визначаємо значення часу t_j , які відповідають амплітудам $y_j = j \Delta y$ в діапазоні зміни амплітуд $y_{\min} \leq y_j \leq y_{\max}$.

Диференціювання перетвореного сигналу у сигнал інтенсивності. Виконуємо диференціювання перетвореного сигналу $t(y)$ у сигнал інтенсивності $\tau(y)$, застосовуючи центральну різницю

$$\tau(y) = dt / dy = (t_{j+1} - t_j) / \Delta y. \quad (6)$$

Описане диференціювання (6) є взаємно однозначним, що дає змогу відновити сигнал $t(y)$ шляхом зворотного інтегрування $\tau(y)$. Наведемо приклади застосування перетворення системи координат вимірювання багатокомпонентних сигналів двох фізико-хімічних процесів.

Електрохімічне визначення концентрацій хімічних елементів. Розглянемо на рис. 1 перетворення системи координат для сигналу вимірювання потенціалів інверсії у часі $e(t)$ для визначення концентрацій хімічних елементів (цинк, кадмій, свинець, мідь).

Інтегральна сума вимірювань багатокомпонентного процесу інверсії $e(t)$ (рис. 1.а) перетворюється у суму компонентів сигналу інтенсивності $\tau(e)$ (рис. 1.в).

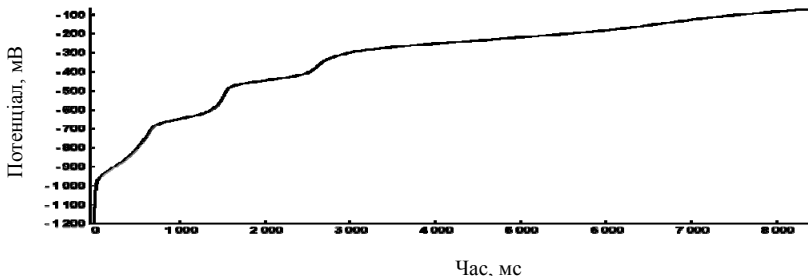
Ідентифікація хімічного елементу здійснюється за потенціалом піку (точка максимуму) та діапазоном вимірювання компонента $\varphi(e)$ (точки

мінімуму e_1, e_2). Виділення окремих компонентів $\varphi(e)$, що належать елементу в багатокомпонентному сигналі, виконується за математичною моделлю сигналу інтенсивності $\tau(e)$ шляхом розв'язання задачі параметричної ідентифікації [17].

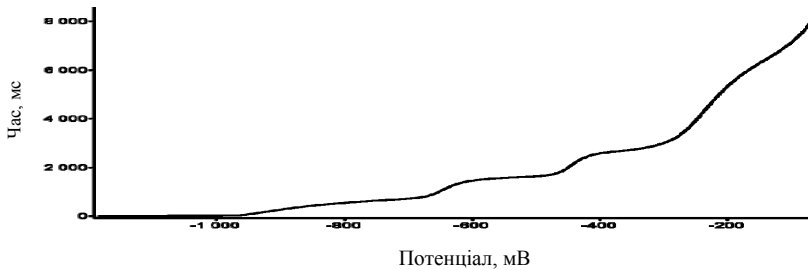
Час інверсії хімічного елемента T , пропорційний концентрації хімічного елемента, визначається за сигналом інтенсивності $\tau(e)$ як площа компоненту $\varphi(e)$ у діапазоні $[e_1, e_2]$:

$$T = \int_{e_1}^{e_2} \tau(e) de = \sum_{i=e_1}^{e_2} \tau(e_i) . \quad (7)$$

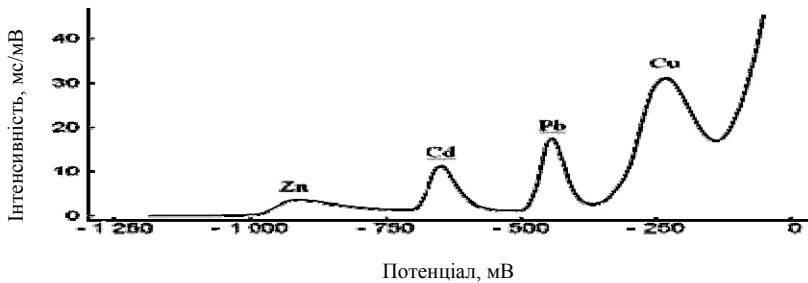
За часом інверсії компонента T , визначеного в сигналах вимірювання розчинів фону, проби об'єкта та проби з добавкою відомої маси стандартного зразка іонів елемента, визначається концентрація хімічного елемента в об'єкті навколишнього середовища.



а) фільтрований сигнал вимірювання концентрацій $e(t)$



б) перетворений сигнал $t(e)$



в) сигнал інтенсивності $\tau(e)$

Рис. 1. Перетворення структури даних сигналу вимірювання концентрацій

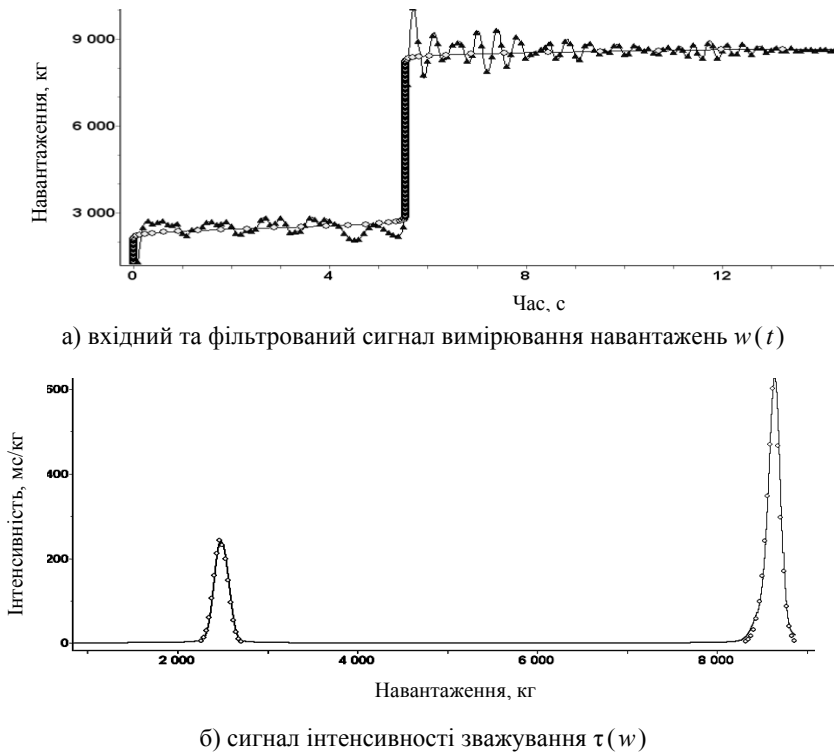


Рис. 2. Перетворення структури даних сигналу динамічного зважування автомобіля

Динамічне зважування автомобіля. Застосування редукції вхідних даних дало змогу вирішити важливу технічну проблему визначення навантажень на осі автомобіля за сигналом динамічного зважування під час заїзду на платформу автомобільних ваг [18] для здійснення митного вагового контролю транспортних засобів у Міжнародних автомобільних пунктах пропуску.

Розглянемо на рис. 2 перетворення системи координат для сигналу вимірювання навантажень $w(t)$ двохосного автомобіля, який одержують з тензометричних давачів під час заїзду транспортного засобу на платформу статичних ваг. Одержані дані є монотонно зростаючим інтегральним сигналом багатокомпонентного поосного зважування, який спотворено високочастотними завадами. Корисний сигнал зважування $w(t)$ відновлюємо методом частотно-часової фільтрації.

Інтегральна сума вимірювання навантажень багатокомпонентного процесу зважування $w(t)$ перетворилась у суму компонентів сигналу інтенсивності $\tau(w)$.

Ідентифікація компонента навантаження на j вісь автомобіля здійснюється за абсцисою піку w_j (точка максимуму компоненту).

Рівень навантаження на вісь автомобіля G_j обчислюємо як різницю між сусідніми значеннями параметрів w_j :

$$G_j = w_j - w_{j-1}, \quad (8)$$

контролюючи значення поосних навантажень за загальною масою, визначеною у статичному режимі зважування автомобіля.

Наведені приклади перетворення системи координат багатокомпонентних сигналів фізико-хімічних процесів підтверджують ефективність застосування редукції даних вимірювання для розв'язання технічних завдань.

ПРИЛАДИ ТА СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ

За ініціати́ви академі́ка Скури́хіна В.І. у 1987 р. розроблено перший в Україні прилад вимірювання концентрацій важких металів «Аналіз ТМ» з використанням електрохімічного методу інверсійної хронопотенціометрії, запропонованого хіміками Національного університету біоресурсів і природокористування України. Надалі було розроблено пристрої: «Хронополярограф», «МА-1020», «МХА1000» та аналізатор «М-ХА1000-5», які визначали концентрації п'яти важких металів (свинець, кадмій, цинк, мідь, олово) у харчових продуктах та воді з чутливістю вимірювання концентрацій 1 мікрограм на літр. Усього було вироблено понад 350 приладів, які активно застосовувались в роботі санітарно-епідеміологічної служби МОЗ України, в лабораторіях якості продукції, в наукових та учбових лабораторіях. Але ці прилади не дали змогу визначати такі елементи, як ртуть, миш'як та інші, які нормуються для визначення якості питної води та харчових продуктів.

Було розроблено нову інтелектуальну інформаційну технологію та високочутливу аналітичну систему «Аналізатор ІХП» для визначення екологічного стану об'єктів навколишнього середовища, характеристики якої перевищують міжнародні стандарти високого рівня. Вдалося підвищити чутливість вимірювання концентрацій хімічних елементів до 0,01 мікрограма на літр завдяки застосуванню вперше в світовій практиці трьох імпульсних методів електрохімічного аналізу: імпульсної інверсійної хронопотенціометрії (pulse stripping chronopotentiometry, PSCP); диференційної імпульсної хронопотенціометрії (differential pulse stripping chronopotentiometry, DPSCP); окислювальної імпульсної хронопотенціометрії (oxidative pulse stripping chronopotentiometry, OPSCP). Наукову новизну запропонованих методів підтверджено патентами на винахід [20, 21].

Інформаційна технологія використовує нові цифрові методи оброблення: спосіб перетворення монотонних вхідних даних, методи високочастотної фільтрації та адаптивного згладжування, побудова генеративної моделі багатокомпонентного сигналу [17]. Додання до приладу функцій іономіра дало змогу розширити можливості аналітичній системи [22].

«Аналізатор ІХП» може вимірювати концентрації 14 токсичних елементів методами інверсійної хронопотенціометрії (ртуть, миш'як, свинець, кадмій, цинк, мідь, олово, нікель, кобальт, залізо, марганець, селен, йод, хром) та 6 хімічних речовин за розробленим методом хроноіонометрії (калій, натрій, кальцій, фтор, амоній та нітрати), що дає змогу визначати екологічний стан різних об'єктів довкілля, якість питної води та харчових продуктів. Систему «Аналізатор ІХП» впроваджено в навчальну та наукову діяльність НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» та в Харкову контрольно-виробничу лабораторію Київської обласної спілки споживчих товариств.

Для вирішення важливої екологічної проблеми оцінювання стану забруднення земної атмосфери розроблено інформаційну технологію «Атмосферні гази», яка, використовуючи спектр пропускання атмосферного повітря, одержаного інфрачервоним Фур'є-спектрометром (розробка Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України), дає змогу виконувати дистанційне зондування газових викидів промислових підприємств в наземних комплексах, з борту літака або космічного апарату. Після перетворення системи координат вхідного спектру, з використанням банку

даних спектральних ліній газів та ітераційної моделі ідентифікується наявність та визначається концентрація 38 газів атмосфери. Особливу увагу приділяють визначенню концентрації озону, метану, вуглекислого та сірчаного газів, які сприяють виникненню парникового ефекту і негативно впливають на клімат Землі та здоров'я людей. Інформаційну технологію «Атмосферні гази» впроваджено та застосовують в Головній астрономічній обсерваторії НАН України [23].

КОМП'ЮТЕРНО-ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНА ПЛАТФОРМА

Розроблені методи теорії редукції, передові технології зв'язку 5G, 6G та широке застосування пристроїв Інтернету речей в системах екологічного моніторингу спонукають до побудови сенсорних систем з використанням підключення через Ethernet, WiFi та контролери IOT [24, 25]. Для цього розробляється інформаційна технологія експрес-аналізу екологічної якості питної води з використанням переносних, підключених до хмарних сервісів приладів електрохімічного вимірювання концентрації токсичних елементів. Кінцевим напрямом цих досліджень буде розроблення комп'ютерно-телекомунікаційної платформи для завдань екологічного моніторингу та штучного інтелекту з використанням хмарних та передових технологій зв'язку.

Наразі зусилля співробітників відділу екологічних цифрових системи спрямовано на застосування методів когнітивного моделювання для виконання екологічних завдань: оцінювання стану забруднення ділянок поля важкими металами, детоксикації та відновлювання екологічної якості ґрунтів у точному землеробстві; виявлення небезпечних для здоров'я людини екстремальних чинників у різних об'єктах довкілля для профілактики та прогнозування ризиків соціально значимих захворювань населення; розроблення інформаційних технологій вирощування статистичного обліку продуктів виробництва для фермерських господарств тощо [26].

ВИСНОВКИ

Реалізація принципів теорії редукції уможливорює розв'язання важливих практичних завдань класифікації образів, ідентифікації об'єктів, пошуку аномальних тенденцій у фінансовій діяльності підприємств, виявлення шахрайських транзакцій у банківській системі та прихованих закономірностей у великих даних тощо.

Для класу задач з монотонними інтегральними даними вимірювань необхідно застосовувати перетворення системи координат, що дає змогу розглянути багатокomпонентний сигнал як суму окремих компонентів. Такий підхід дав можливість розробити: високочутливу аналітичну систему «Аналізатор ІХП» для визначення екологічного стану об'єктів навколишнього середовища; систему визначення навантажень на осі автомобіля за динамічним сигналом зважування для здійснення митного контролю; інформаційну технологію «Атмосферні гази» визначення вмісту парникових газів в земній атмосфері для дистанційного зондування газових викидів промислових підприємств.

Розглянуті в статті принципи теорії редукції, оригінальні результати розв'язання задач класифікації, ідентифікації та непрямих вимірювань фізико-хімічних параметрів сприятимуть інтелектуалізації інформаційних технологій та систем, особливо для екологічного моніторингу об'єктів біосфери.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ивин А.А., Медведева И.А., Берштейн В.Л. Редукция. Гуманитарный квартал: Концепты. *Центр гуманитарных технологий*, 2002–2021 (Дата звернення: 29.12.2021). URL: <https://market.ru/concepts/6892>
2. Алгоритмы и программы восстановления зависимостей / Под ред. В.Н. Вапника. М.: Наука, 1984. 816 с.
3. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование экспериментов при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 277 с.
4. Загоруйко Н.Г. Методы анализа данных и знаний. Новосибирск ИМ СО РАН, 1999. 270 с.
5. Vasilyev V.I. The reduction principle in pattern recognition learning (RPL). *Problem. Pattern recognition and Image Analysis*. 1996. N 1. P.23–52.
6. Васильев В.И. Индукция и редукция в проблемах экстраполяции. *Кибернетика и вычисл. техника*. 1998. Вып. 116. с. 65–81.
7. Васильев В.И., Суровцев И.В. Индуктивные методы обнаружения закономерностей, основанные на теории редукции. *Управляющие системы и машины*. 1998. № 5. С. 3–13.
8. Vapnik V. Statistical learning theory. New York: John-Wiley Sans. Inc., 1998. 286 p.
9. Бабак О.В. Об одном подходе к оптимизации решения задач обучения распознаванию образов на основе метода опорных векторов. *Кибернетика и системный анализ*. 2004. № 2. С. 179–185.
10. Бабак О.В. Об одном принципе самоорганизации математических моделей. *Проблемы управления и информатики*. 2001. № 2. С. 98–107.
11. Бабак О.В., Васильев В.И., Чернов В.А. и др. Особенности измерения расхода пилеугольного топлива при вдувании его в фурмы доменной печи. *Сталь*. 1988. № 1. С. 18–20.
12. Пристрій для комбінаторного моделювання фізичних об'єктів: патент на винахід 124909, Україна : МПК (2006). G05B 17/00, G06G 7/48 (2006.01). а202003852; заявл. 26.06.2020; опубл. 08.12.2021, Бюл. № 49.
13. Пристрій регулювання витрати пилевоугільного палива : пат. 82758 Україна : МПК C21B 7/24. а200608430; заявл. 27.07.2006; опубл. 12.05.2008, Бюл. № 9.
14. Пристрій виміру витрати пилевоугільного палива : пат. 83106 Україна : МПК G01F 9/00, G01F 25/00, G05B 17/00. а200608431; заявл. 27.07.2006; 10.06.2008, Бюл. № 11.
15. Способ определения спектра аналогового сигнала: А. С. 845600 СССР. / Скурихин В.И., Пономарева И.Д., Сиверский П.М., Цепков Г.В. 1981.
16. Гриценко В.І., Скурихин В.І., Цепков Г.В. Інформаційні технології цифрової обробки сигналів: нові підходи і перспективи впровадження. *Вісник НАН України*. 2005. № 12. С. 33–41.
17. Суровцев І.В., Галімов С.К., Татарінов О.Е. Інформаційна технологія визначення концентрації токсичних елементів в об'єктах навколишнього середовища. *Кибернетика и вычисл. техника*. 2018. № 191. С. 5–31.
18. Система поосового зважування на платформних вагах : пат. 106013 Україна : МПК G01G 19/02. а201309799; заявл. 06.08.2013; опубл. 10.07.2014, Бюл. №13.
19. Суровцев И.В. Новая информационная технология поосного взвешивания автомобилей на платформенных весах. *Управляющие системы и машины*. 2015. №3. С. 77–81.
20. Пристрій для вимірювання концентрації токсичних елементів : пат. 107412 Україна : МПК G01N 27/48. а201306295; заявл. 21.05.2013; опубл. 25.12.2014. Бюл. №24.
21. Пристрій для вимірювання концентрації хімічних елементів методами імпульсної хронопотенціометрії: пат. 123459, Україна : МПК G01N 27/48 (2006.01). а201902429; заявл. 12.03.2019; опубл. 07.04.2021, Бюл. №14.
22. Surovtsev I.V., Velykyi P.Y., Galimova V.M., Sarkisova M.V. Ionometric method for determination of concentrations of microelements in research of digital medicine. *Cyb. and comp. eng.* 2020. №. 4 (202). С. 25–43.
23. Венгер Е.Ф., Бабак О.В., Суровцев И.В. и др. Алгоритм оперативного косвенного измерения концентрации газовых примесей в атмосфере по спектрам Фурье-спектрометра. *Управляющие системы и машины*. 2007. № 2. С. 33–38, 81.
24. Гриценко В.І., Суровцев І.В., Бабак О.В. Система бездротового зв'язку 5G. *Кибернетика и вычисл. техника*. 2019. № 3 (197). С. 5–19.
25. Гриценко В.І., Бабак О.В., Суровцев І.В. Особливості взаємозв'язку мереж 5G, 6G з великими даними, інтернетом речей та штучним інтелектом. *Cyb. and comp. eng.* 2021. №. 2 (204). С. 5–18.

26. Пристрій для передпосівної обробки насіння : пат. 122085, Україна : МПІК (2020.01) A01C 1/00, A01G 7/04 (2006.01). а201809456; заявл. 19.09.2018; опубл. 10.09.2020, Бюл. № 17.

Отримано 8.02.2022

REFERENCES

1. Ivin A.A., Medvedeva I.A., Bershtein V.L. Reduction. Humanitarian Quarter: Concepts. *Center for Humanitarian Technologies*, 2002–2021 (Last accessed: 12/29/2021), URL: <https://market.ru/concepts/6892> (in Russian).
2. Algorithms and programs for recovering dependencies / Ed. V.N. Vapnik. M.: Nauka, 1984, 816p. (in Russian).
3. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovsky Yu.V. Planning experiments in search of optimal conditions. M.: Nauka, 1976, 277 p. (in Russian).
4. Zagoruiko N.G. Methods of data and knowledge analysis. Novosibirsk *IM SO RAN*. 1999, 270p. (in Russian).
5. Vasilyev V.I. The reduction principle in pattern recognition learning (RPL). *Problem. Pattern recognition and Image Analysis*. 1996, No 1, pp. 23–52.
6. Vasilyev V.I. Induction and reduction in extrapolation problems. *Kibernetika i vychislitel'naâ tekhnika*. 1998, Vol. 116, pp.65–81 (in Russian).
7. Vasilyev V.I., Surovtsev I.V. Inductive methods for pattern detection based on reduction theory. *Control System and Computers*. 1998, No 5, pp. 3–13 (in Russian).
8. Vapnik V. Statistical learning theory. New York: *John-Wiley Sans. Inc.*, 1998, 286.
9. Babak O.V. On one approach to optimizing the solution of problems of learning pattern recognition based on the support vector machine method. *Cybernetics and System Analysis*. 2004, No 2, pp. 179–185 (in Russian).
10. Babak O.V. On one principle of self-organization of mathematical models. *Problems of control and informatics*. 2001, No 2, pp. 98–107 (in Russian).
11. Babak O.V., Vasilyev V.I., Chernov V.A. Peculiarities of measuring the consumption of pilecoal fuel when it is blown into the blast furnace tuyeres. *Steel*. 1988, No 1, pp.18–20 (in Russian).
12. Device for combinatorial modeling of physical objects: patent 124909, Ukraine: IPC (2006). G05B 17/00, G06G 7/48 (2006.01). а202003852; claimed 26.06.2020; published 08.12.2021 (in Ukrainian).
13. Device for adjusting of pulverized coal fuel consumption: patent 82758 Ukraine: IPC C21B 7/24/. а200608430; claimed 27.07.2006; published 12.05.2008 (in Ukrainian).
14. Method for measurement of flow rate of dust-coal fuel: patent 83106 Ukraine: IPC G01F 9/00, G01F 25/00, G05B 17/00. а200608431; claimed 27.07.2006; published 10.06.2008 (in Ukrainian).
15. Method for determining the spectrum of an analog signal: A.S. 845600 USSR. 1981. (in Russian).
16. Gritsenko VI, Skurikhin VI, Tsepkov GV Information technologies of digital signal processing: new approaches and prospects of implementation. *Visnyk NAS of Ukraine*. 2005, No 12, pp. 33–41 (in Ukrainian).
17. Surovtsev I.V., Galimov S.K., Tatarinov O.E. Information technology for determining the concentration of toxic elements in environmental objects. *Kibernetika i vychislitel'naâ tekhnika*. 2018, No.1(191), pp. 5–33. DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt191.01.005> (in Ukrainian).
18. System for axle-by-axle weighing on platform scales : patent 106013 Ukraine: IPC G01G 19/02, а201309799; claimed 06.08.2013; published 10.07.2014 (in Ukrainian).
19. Surovtsev I.V. New information technology for axial weighing of cars on platform scales. *Control System and Computers*. 2015, No 3, pp. 77–81 (in Russian).
20. Device for measuring the concentration of toxic elements: patent 107412, Ukraine: IPC (2006) G01N 27/48. а201306295; claimed 21.05.13; published 25.12.14 (in Ukrainian).
21. Device for measuring the concentration of chemical elements by pulsed chronopotentiometry: patent 123459, Ukraine: IPC G01N 27/48 (2006.01). а201902429; claimed 12.03.2019; published 07.04.2021 (in Ukrainian).
22. Surovtsev I.V., Velykyi P.Y., Galimova V.M., Sarkisova M.V. Ionometric method for determination of concentrations of microelements in research of digital medicine. *Cyb. and comp. eng.*, 2020, No 4 (202), pp. 25–43.

23. Wenger E.F., Babak O.V., Surovtsev I.V. et al. Algorithm for operational indirect measurement of the concentration of gaseous impurities in the atmosphere by Fourier spectrometer spectra. *Control System and Computers*, 2007, No 2, pp.33–38, 81 (in Russian).
24. Gritsenko V.I., Surovtsev I.V., Babak O.V. 5G wireless communication system. *Cyb. and comp. eng.* 2019, No 3 (197), pp. 5-19. DOI: 10.15407/kvtl197.03.005 (in Ukrainian).
25. Gritsenko V.I., Babak O.V., Surovtsev I.V. Peculiarities of interconnection 5G, 6G networks with big data, internet of things and artificial intelligence. *Cyb. and comp. eng.* 2021, No 2 (204), pp. 5–19 (in Ukrainian).
26. Device for pre-sowing seed treatment: patent 122085, Ukraine: IPC (2020.01) A01C 1/00, A01G 7/04 (2006.01). a201809456; claimed 19.09.2018; published 10.09.2020 (in Ukrainian).

Received 8.02.2022

Babak O.V., PhD (Engineering),
Senior Researcher of the Ecological Digital Systems Department
Ecological Digital Systems Department
ORCID: 0000-0002-7451-3314
e-mail: dep115@irtc.org.ua

Surovtsev I.V., DSc (Engineering), Senior Researcher,
Head of the Ecological Digital Systems Department
ORCID: 0000-0003-1133-6207
e-mail: igorsur52@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,
40, Acad. Glushkov av., Kyiv, 03187, Ukraine

DATA REDUCTION AS A METHOD OF INTELLECTUALIZATION OF INFORMATION TECHNOLOGIES

Introduction. *The principles of reduction theory in the form of methods for detecting hidden patterns in data, approaches to transforming coordinate systems and reducing the dimensionality of input information are widely used in identifying and classifying objects, finding abnormal trends in financial activities, technical systems for measuring physical and chemical parameters.*

The purpose of the paper is to review the theoretical and practical results of the application of the theory of reduction in problems and data processing systems.

Methods. *Methods for detecting hidden patterns in data, classification of objects using alpha procedure, cognitive modeling of environmental data, frequency-time digital filtering, conversion and modeling of multicomponent signals, measuring concentrations of chemicals in the environment and the content of greenhouse gases in the earth atmosphere, determining the loads on the axis of the car on the signal of dynamic weighing, estimating the consumption of pulverized coal to save coke and natural gas blast furnace.*

Results. *Principles of the theory of reduction, highly sensitive analytical system "Analyzer SCP" for measuring concentrations of 20 chemicals in drinking water, food and the environment using three new pulsed chronopotentiometry methods for electrochemical analysis, information technology "Atmospheric gases" for determining concentrations of 38 gases atmosphere, computer systems of dynamic weighing of the car for customs weight control of vehicles.*

Conclusions. *For a class of problems with monotonic integrated measurement data, it is necessary to transform the coordinate system, which allows us to consider a multicomponent signal as the sum of individual components. The use of reduction theory methods has made it possible to develop intelligent information technologies for environmental monitoring of biosphere objects, effective technical systems for measuring physical parameters, and detecting fraudulent transactions in the banking system.*

Keywords: *reduction theory, hidden patterns, object classifications, coordinate system transformations, frequency-time filtering, concentration determination.*

DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt207.01.032>

УДК: 004.942:001.57+004.03+519.85+612.5 CC BY-NC

ЄРМАКОВА І.Й., д-р біол. наук, проф.,
провід. наук. співроб.,
ORCID: 0000-0002-9417-1120, e-mail: irena.yermakova@gmail.com

НІКОЛАЄНКО А.Ю., канд. техн. наук,
старш. наук. співроб.,
ORCID: 0000-0002-2402-2947, e-mail: n_nastja@ukr.net

БОГАТЬОНКОВА А.І., канд. техн. наук,
старш. наук. співроб.,
ORCID: 0000-0002-7536-5958, e-mail: bogatonkova@gmail.com

ТАДЕЄВА Ю.П., канд. техн. наук,
старш. наук. співроб.,
ORCID: 0000-0001-5418-2848, e-mail: jbest0207@gmail.com
Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій
та систем НАН України та МОН України,
відд. комплексних досліджень інформаційних технологій,
пр. Акад. Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна

МУЛЬТИФУНКЦІЙНА ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМОФІЗІОЛОГІЧНОГО СТАНУ ЛЮДИНИ ЗА ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВ

Вступ. На сьогодні розроблено багато математичних моделей прогнозування фізіологічних реакцій людини, але більшість з них орієнтовано на розв'язання вузького спектру виконуваних завдань і не враховують поєднання різноманітних чинників, які можуть впливати на людину.

Метою роботи є розроблення мультифункціональної інформаційної системи моделювання термофізіологічного стану людини, яка дає змогу комплексно оцінити вплив екстремальних умов на організм людини.

Результати. Запропонована інформаційна система уможлиблює виконання великого класу завдань, пов'язаних з оцінюванням одночасного впливу на людину різноманітних екстремальних умов: високі та низькі температури середовища, вологе та сухе повітря, пронизливий вітер, інтенсивна фізична активність, перебування у холодній воді, паронепроникний захисний одяг, довгохвильова та короткохвильова сонячна радіація, температурна неоднорідність приміщення і вплив електромагнітних полів.

Висновки. Розроблена інформаційна система надає можливість отримати попередні рекомендації щодо фізіологічних резервів організму, ризиків погіршення функціонального стану людини, часу безпечного перебування людини в заданих умовах середовища, температурного комфорту людини у приміщенні під час професійної діяльності, впливу електромагнітної гіпертермії на людину у радіочастотному діапазоні тощо.

Ключові слова: модель терморегуляції людини, інформаційна технологія, фізична активність, умови навколишнього середовища, захисний одяг, температурний комфорт, електромагнітне випромінювання.

© ЄРМАКОВА І.Й., НІКОЛАЄНКО А.Ю., БОГАТЬОНКОВА А.І., ТАДЕЄВА Ю.П., 2022

ВСТУП

Математичне моделювання фізіологічних реакцій людини є одним з основних методів їх вивчення нарівні зі спостереженнями на людях. Такий підхід дає змогу досліджувати ситуації небезпечні, а часом неприпустимі під час спостережень на людях. Гнучкість математичних моделей терморегуляції дає змогу легко вносити зміни і швидко отримувати результати розрахунків. Моделювання забезпечує краще розуміння фундаментальних механізмів та допомагає у формулюванні і випробуванні гіпотез разом з експериментальними програмами. На сьогодні розроблено багато математичних моделей прогнозування фізіологічних реакцій людини, але більшість з них орієнтовано на рішення розв'язання спектру виконуваних завдань і не враховують поєднання різноманітних чинників, які можуть впливати на людину [1].

Ця робота була виконана в Міжнародному науково-навчальному центрі інформаційних технологій та систем НАН та МОН України і присвячується його 25-річчю.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Мультифункціональна інформаційна система моделювання термофізіологічного стану людини за екстремальних умов базується на комплексі математичних мультикомпаратментальних моделей терморегуляції і теплообміну у людини [2, 3].

Комплекс моделей описує теплопродукцію в органах і тканинах, перенос тепла кров'ю і кондукцією, теплообмін з середовищем шляхом конвекції, випромінювання і випаровування з поверхні шкіри і верхніх дихальних шляхів, аферентні та еферентні терморегуляторні ланки. Побудову таких моделей виконано на основі фактичного експериментального матеріалу, що характеризує механізми фізіологічної терморегуляції у людини у навколишніх умовах залежно від професійної діяльності.

В основі структури моделей є компартмент — елементарна одиниця, яка має джерело енергії, здатність приймати і передавати тепло сусіднім компартментам і обмінюватися енергією з середовищем. Апроксимація тіла людини визначається кількістю компартментів і зв'язками між ними. Геометричну форму тіла людини у цій роботі було апроксимовано набором з 39 компартментів. Голова у надано у вигляді двошарової сфери, зовнішній шар якої відповідає шкірі, а внутрішній — мозку. Тіло людини умовно розділено на 13 багатошарових циліндрів: тулуб, плечі, передпліччя, кисті, стегна, гомілки, стопи. Тулуб надано такими компартментами: внутрішні органи, м'язи, жир та шкіра; руки і ноги — м'язи, жир та шкіра; а кисті і стопи — м'язи та шкіра (Рис. 1). Шар циліндра або сфери — це компартмент, який відповідає певному органу або тканині організму. Кров надано окремим компартментом, який відповідає резервуару змішування теплових потоків в великих венозних судинах і серці.

Відповідно до мети дослідження можливо змінювати апроксимацію тіла людини (кількість сегментів і компартментів), анатомічні параметри, біофізичні характеристики компартментів, базові фізіологічні характеристики й адаптаційні властивості людини.

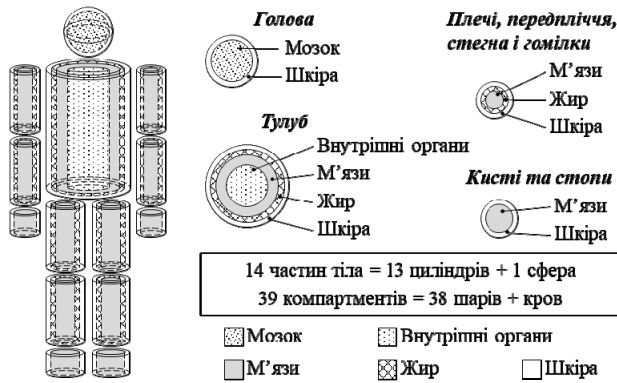
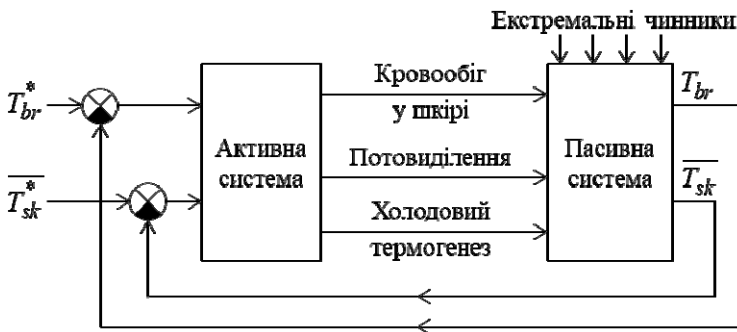


Рис. 1. Апроксимація тіла людини

Метою роботи є створення мультифункціональної інформаційної системи моделювання термофізіологічного стану людини, яка дає змогу комплексно оцінити вплив умов повітряного і водного середовищ, фізичної активності, рівня адаптації, захисного одягу і спорядження, температурної асиметрії приміщення та електромагнітного випромінювання на організм людини.

МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ТЕРМОФІЗІОЛОГІЧНОГО СТАНУ ЛЮДИНИ

Призначенням фізіологічної системи терморегуляції є підтримання температури тіла в межах обмеженого діапазону у разі зміни рівня внутрішнього теплоутворення і температури навколишнього середовища. У цьому випадку терморегуляцію людини подано як взаємодію двох систем — активної і пасивної (Рис. 2). Активна система описує фізіологічні реакції терморегуляції, спрямовані на підтримку температурного гомеостазу, а також аферентні і еферентні ланки. До пасивної системи належать фізіологічні процеси, пов'язані з утворенням і перенесенням тепла всередині тіла людини та теплообміном з середовищем. Ключовою структурою в моделі є центр терморегуляції, який здійснює керування системою зі зворотнім зв'язком — за температурою мозку і середньою температурою шкіри.



T_{br} — температура мозку, $\overline{T_{sk}}$ — середня температура шкіри,
* — початкове значення (set-point)

Рис. 2. Блок-схема терморегуляції людини

Мета системи регулювання теплообмінних потоків — забезпечення такого стаціонарного нерівноважного стану, за якого зберігається балансове співвідношення між виробленим і утилізованим теплом.

Універсальний запис рівняння розрахунку динаміки температури для будь-якого компартмента, крім крові, має вигляд:

$$c_{ij} m_{ij} \frac{dT_{ij}}{dt} = M_{ij} - Q_{ij} - a_{ij-1} \lambda_{ij-1} (T_{ij} - T_{ij-1}) - a_{ij} \lambda_{ij} (T_{ij} - T_{ij+1}) - \rho_b c_b W_{ij} (T_{ij} - T_b), i = \overline{1, N}, j = \overline{1, K}, \quad (1)$$

де T — температура, $^{\circ}\text{C}$; t — час, год.; c — питома теплоємність, ккал/(кг $\cdot^{\circ}\text{C}$); m — маса, кг; M — метаболізм, ккал/год; Q — тепловий потік, ккал/год; a — товщина компартмента, м; λ — коефіцієнт теплопровідності, ккал/(м $\cdot^{\circ}\text{C}\cdot\text{год}$); ρ — густина, кг/м 3 ; w — об'ємна швидкість крові. Індеси: i — номер циліндра; j — номер шару; b — кров; N — кількість циліндрів; K — кількість шарів у циліндрі.

Температура крові T_b на кожному кроці інтегрування прийнята однаковою для всіх компартментів і дорівнює температурі резервуара змішування потоків кров'ю у великих венозних судинах, серці і легенях:

$$V_b \rho_b c_b \frac{dT_b}{dt} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K w_{ij} \rho_b c_b T_{ij} - W \rho_b c_b T_b - Q^{RS}, \quad (2)$$

де V — об'єм, л; W — серцевий викид, л/год; Q^{RS} — теплові втрати з диханням, ккал/год.

Загальні теплові втрати диханням складаються з теплової взаємодії між повітрям, яке вдихається і видихається, та тепловіддачі випаровуванням води з верхніх дихальних шляхів:

$$Q^{RS} = \tilde{V} \rho^{air} L^{air} (y_{ex} - y_{in}) + \tilde{V} \rho^{air} c^{air} (T_b - T^{air}), \quad (3)$$

де \tilde{V} — швидкість легеневої вентиляції, л/год; L — питома теплота пароутворення, ккал/кг; y — вологовміст (масова кількість водяної пари в повітрі, віднесена до маси сухого повітря). Індеси: ex — повітря, яке видихається; in — повітря, яке вдихається.

Теплообмін людини з *навколишнім повітряним середовищем* відбувається за рахунок випаровування, випромінювання і конвекції. Кількість тепла, що віддається організмом кожним з цих шляхів, залежить від температури, вологості і швидкості руху повітря:

$$Q_{ij}^{air} = h_{ij}^C A_{ij} (T_{ij} - T_i^{air}) + h_{ij}^R A_{ij} (T_{ij} - T_i^{air}) + h_{ij}^E A_{ij} \left(P_{ij} - \frac{\varphi_i}{100\%} P_i^{air} \right), \quad (4)$$

де h — коефіцієнт теплообміну; A — площа поверхні тіла, м 2 ; P — тиск насичених і ненасичених парів, кПа; φ — відносна вологість повітря, %. Індеси: C — конвекція; R — випромінювання; E — випаровування; air — повітря.

У воді теплообмін людини відбувається тільки шляхом конвекції:

$$Q_{ij}^{water} = h_{ij}^{water} A_{ij} (T_{ij} - T_i^{water}), \quad (5)$$

Коефіцієнт теплообміну конвекцією в воді залежить від теплопровідності води, коефіцієнта Нуссельта і діаметра компартмента:

$$h_{ij}^{water} = K^{water} \cdot Nu/d_{ij}, \quad (6)$$

де K — теплопровідність; Nu — число Нуссельта; d — діаметр компартмента. Індеси: *water* — вода.

Загальна кількість метаболічного тепла складається з базового рівня, тепла, яке утворюється в організмі людини під час фізичної активності, та тепла, яке утворюється за рахунок холодового тонуусу і тремтіння скелетних м'язів:

$$M = M^* + M^a + M^{sh}, \quad (7)$$

де індеси: $*$ — початкове значення; a — фізична активність; sh — холодове тремтіння скелетних м'язів.

Фізичну активність людини включено у комплекс моделей. Більша частина енергії, яка витрачається на фізичну активність, перетворюється в тепло M^a у скелетних м'язах тіла через низьку ефективність механічної роботи людини:

$$M^a = (1 - \eta) \cdot k^{eq} \cdot qO_2, \quad (8)$$

де η — коефіцієнт корисної дії, $0 \leq \eta \leq 1$; qO_2 — споживання кисню, л/год; k^{eq} — теплотворний еквівалент кисню, ккал/л.

У приміщенні термофізіологічний стан людини суттєво залежить від довгохвильового випромінювання. Незначна температурна неоднорідність або зміна розмірів приміщення приводить до істотних змін фізіологічного стану людини. Тому розрахунок середньої радіаційної температури приміщення є ключовим моментом у моделі для прогнозування впливу теплообміну випромінюванням. Середня радіаційна температура приміщення залежить від температурної неоднорідності поверхонь, розмірів кімнати і місцезнаходження людини. Середня радіаційна температура у певній точці простору визначається кутовими факторами проєкції від кожного елементу навколишніх предметів та поверхонь приміщень до людини:

$$T_r = \sum_i \sum_m T_{im} \cdot F_{im}, \quad (9)$$

$$F_{im} = f_{max} (1 - e^{-(a_{im}/c_{im})/\tau}) (1 - e^{-(b_{im}/c_{im})/\gamma}), \quad (10)$$

$$\tau = A + B \left(\frac{a_{im}}{c_{im}} \right), \quad \gamma = C + D \left(\frac{b_{im}}{c_{im}} \right) + E \left(\frac{a_{im}}{c_{im}} \right), \quad (11)$$

де T_r — середня радіаційна температура, $^{\circ}C$; F — кутовий фактор проєкції поверхонь; a — довжина частини поверхні, м; b — висота частини поверхні, м; c — відстань від людини до поверхні, м; l — номер поверхні приміщення (стіна, підлога, стеля); m — номер частини поверхні; f_{max} — коефіцієнти, згідно з міжнародним стандартом ISO 7726:1998 [4].

Вплив електромагнітного випромінювання (далі — ЕМВ) радіочастотного діапазону на термофізіологічний стан людини визначається поглиненою біологічними тканинами ЕМВ. Кількість тепла, яке абсорбується в тканинах внаслідок радіочастотної гіпертермії, залежить від потужності та частоти джерела

ЕМВ, затухання енергії електромагнітної хвилі у верхніх шарах гомогенної шаруватої структури тіла, біофізичних характеристик біологічних тканин, розмірів та розташування опромінюваної ділянки тіла людини:

$$EM_{ij} = (\Psi(0) - \sum_{j=1}^K SAR_{ij-1}) \cdot B \cdot \left[1 - \exp \left[-2\sqrt{2}\pi \frac{a_{ij} \cdot f}{c} \cdot \sqrt{\epsilon_{ij} \cdot \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_{ij}}{2\pi f \epsilon_{ij} \epsilon_0} \right)^2} - 1 \right)} \right] \right], \quad (12)$$

де EM — поглинене тепло внаслідок ЕМВ, Вт; $\Psi(0)$ — питома щільність потужності джерела ЕМВ, Вт/м²; a — товщина шару, м; SAR — поглинена доза ЕМВ, Вт/м²; B — площа грані, через яку проникає електромагнітне випромінювання, м²; f — частота ЕМВ, Гц; c — швидкість світла у вакуумі, м/с; ϵ — відносна діелектрична проникність біологічної тканини; ϵ_0 — абсолютна діелектрична проникність вакууму, Ф/м; σ — питома електропровідність біологічної тканини, См/м.

АРХІТЕКТУРА МУЛЬТИФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

Мультифункціональна інформаційна система має клієнт-серверну архітектуру. Сервер системи складається з програми керування потоками даних, комплексу математичних моделей та бази даних. Клієнтську частину реалізовано як десктопні, мобільні і веб-застосунки. Клієнт дає змогу вводити, первинно контролювати і передавати дані на сервер, а потім приймати і відображати результати на екрані свого пристрою. Користувач може переглянути значення фізіологічних показників і графік зміни вибраного показника в динаміці, що дає змогу відстежувати перехідні процеси і безпечний термін перебування в заданих умовах.

Інформаційна система містить сім базових інформаційних модулів: «Людина», «Фізична активність», «Повітряне середовище», «Водне середовище», «Одяг», «Приміщення», «Електромагнітне випромінювання». Кожному модулю відповідає окремий клас характеристик, властивостей і подій. До характеристик модулів належать фізичні та біофізичні величини, константи і параметри, які можна виміряти або отримати з довідкових даних. До властивостей належать алгоритми розрахунку фізіологічних змінних і обчислюваних параметрів, до подій належать алгоритми взаємодії між модулями.

У модулі «Людина» враховано анатомічні параметри та фізіологічні характеристики: маса, зріст, площа поверхні тіла, біофізичні характеристики тканин і органів людини, швидкість регулюючих реакцій організму, рівень базового метаболізму, споживання кисню, швидкість базового артеріального і венозного кровообігу, густина і питома теплоємність крові, коефіцієнти теплопередачі і теплообміну, невідчутне випаровування, легенева вентиляція, серцевий викид у стані спокою тощо. Для моделювання адаптаційних властивостей людини є можливим змінювати пороги збудження і температурну чутливість центральної та периферичної нервової систем.

Модуль «Фізична активність» надає можливість враховувати вид, потужність і тривалість фізичної активності, а також швидкість руху людини.

Вид фізичної активності (біг, ходьба, їзда на велосипеді, плавання різними стилями тощо) задається ефективністю роботи і коефіцієнтами пропорційності, які відображають відносний розподіл фізичної активності по залучених групах скелетної мускулатури тіла.

Модуль «*Повітряне середовище*» характеризується температурою, відносною вологістю і швидкістю руху повітря, середньою радіаційною температурою, тиском насичених парів, питомою теплотою пароутворення, коефіцієнтом теплопровідності повітря.

Модуль «*Водне середовище*» характеризується рівнем занурення людини у воду, температурою води та коефіцієнтами конвективного теплообміну. Можливо моделювати різні рівні занурення, наприклад: повне занурення людини з головою у воду; людина занурена по шию у воду, а голову утримує над водою; людина по плечі у воді, а голова і руки на повітрі; людина по пояс у воді, по коліна у воді, по щиколотки у воді тощо.

Модуль «*Одяг*» дає змогу задавати конструкцію, комплект, вид та матеріал одягу і захисного спорядження. Для кожної частини тіла, яка захищена одягом, поверх шкіри вводиться додатковий компартмент. Компартментам одягу присвоюються характеристики вибраного матеріалу: товщина і щільність тканини, коефіцієнти теплоізоляції і паронепроникності, питома теплоємність, коефіцієнт, який враховує збільшення площі поверхні через одяг, індекс паропроникності. Для кожного компартмента одягу або захисного спорядження розраховується маса, коефіцієнт теплообміну між шкірою та одягом, загальний опір випаровуванню і задається його початкова температура.

Модуль «*Приміщення*» включає довгохвильову радіацію та температурну асиметрію приміщення. Він дає змогу врахувати розміри і температурну неоднорідність поверхонь, місцезнаходження і положення людини у приміщенні, одяг, рівень фізичної активності людини та наявність сонячної короткохвильової радіації. Враховується ширина, довжина і висота приміщення, відстань від стін, підлоги і стелі до людини.

Модуль «*Електромагнітне випромінювання*» дає змогу задавати локацію ділянки опромінення і характеристики електромагнітного поля. Локація ділянки опромінення визначається розмірами джерела опромінення та його розташуванням — на поверхні тіла або у внутрішніх органах. Це дає змогу моделювати загальну, регіональну або локальну дію зовнішніх або імплантованих гіпертермічних аплікаторів. Характеристики електромагнітного поля визначаються потужністю, частотою і тривалістю експозиції.

Сценарії взаємодії між базовими модулями чітко прописано та запрограмовано у *інтегровальному модулі*. Комбінація модулів збагачує можливості розробленої мультифункціональної інформаційної системи.

Інтегровальний модуль уможливив:

- оцінювання сумісного впливу на термофізіологічний стан людини умов повітряного та водного середовищ, видів та інтенсивності фізичної активності, ансамблів одягу та захисного спорядження;
- оцінювання ступеня адаптації людини до різних умов середовища та інтенсивної фізичної активності;

- прогнозування часу до настання перегрівання і зневоднення або переохолодження організму людини за екстремальних умов середовища;
- оцінювання температурного комфорту людини в приміщенні;
- отримання прогнозу впливу на людину характеристик електромагнітного випромінювання в радіочастотному діапазоні;
- дослідження впливу випромінювання мобільного телефона на температуру мозку людини.

До модулю аналізу даних надходять всі результати обчислень: динаміка локальних і середніх температур, метаболічних процесів і теплових потоків, об'ємної швидкості крові, серцевого викиду, ударного обсягу серця, частоти серцевих скорочень, швидкості випаровування і стікання поту, загальних втрат води організмом тощо. Динаміка цих показників є прогнозом термофізіологічного стану людини. Після оброблення та аналізування результатів моделювання формуються рекомендації і висновки щодо фізіологічних резервів організму, часу безпечного перебування в заданих умовах і можливих ризиків погіршення термофізіологічного стану людини.

Десктопні, мобільні і веб-застосунки уможливають візуалізацію результатів моделювання. Це дає змогу превентивно оцінити фізіологічні резерви організму людини в екстремальних умовах середовища, щоб вчасно вжити превентивних заходів.

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ЛЮДИНИ В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВАХ СЕРЕДОВИЩА З НАМІРОМ УНИКНЕННЯ ПОШКОДЖЕННЯ ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ.

Оцінювання впливу захисного одягу на термофізіологічний стан людини. Умови проведених модельних досліджень [5]: людина виконує фізичну роботу потужністю 300 Вт на відкритому повітрі протягом двох годин, температура повітря 40 °С, відносна вологість повітря (ϕ) 20 % і 50 %, швидкість руху повітря 1 м/с. Порівняно два ансамблі одягу: звичайний бавовняний костюм (A1) і спеціальний захисний костюм (A2). Характеристики A1: теплоізоляція 0,037 м²·С/Вт, паропроникність 0,0066 м²·кПа/Вт. Характеристики A2: теплоізоляція 0,119 м²·С/Вт, паропроникність 0,017 м²·кПа/Вт.

Для оцінювання теплового навантаження на організм людини використано індекс теплового стресу [6]:

$$HSI = e^{req} / e^{max}, \quad (13)$$

де HSI — індекс теплового стресу; e^{req} — швидкість необхідного випаровування для підтримання теплового балансу, ккал/год; e^{max} — максимально можливе в даних умовах середовища випаровування, ккал/год.

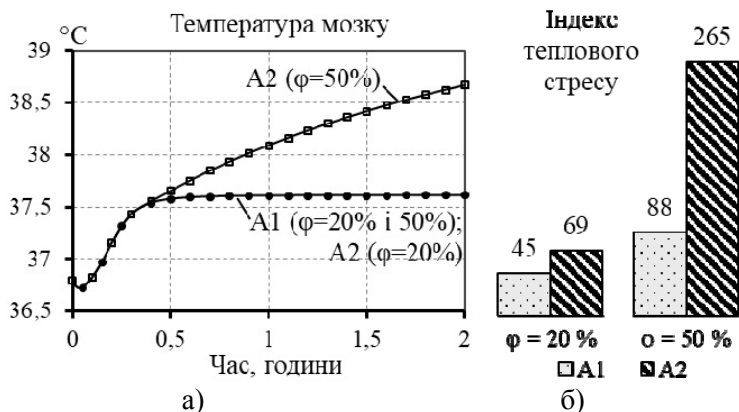


Рис. 3. Динаміка температури мозку людини (а) та індекс теплового стресу HSI (б) залежно від одягу і вологості повітря

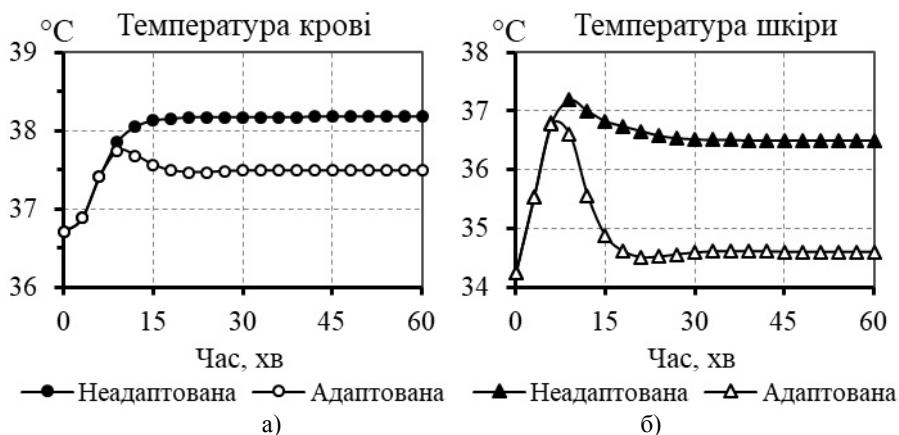


Рис. 4. Динаміка температури крові (а) і середньої температури шкіри (б) неадаптованої та адаптованої людини

За індексом теплового стресу умова A1 за $\phi = 20\%$ є некомфортною, але стерпною; умови A1 за $\phi = 50\%$ та A2 за $\phi = 20\%$ є нестерпними; час безпечного для здоров'я людини перебування за умови A2 за $\phi = 50\%$ є обмеженим (Рис. 3).

У людини за умов A1 (за $\phi = 20\%$ і $\phi = 50\%$) та A2 (за $\phi = 20\%$) загальні втрати води організмом за дві години становлять 1040 г. Втрати води 1,5 % від маси тіла не загрожують здоров'ю людини [7]. У людини за умови (A2) за $\phi = 50\%$ загальні втрати води організмом складають 1700 г за дві години, що становить приблизно 2,4 % від маси тіла людини.

Оцінювання ступеня адаптації людини до інтенсивної фізичної активності за високої температури повітря. Людина протягом однієї години біжить зі швидкістю 7,5 км/год, енерговитрати 600 Вт, температура повітря 45 °C.

Для адаптованої людини усталене значення температури крові становить 37,5 °C, що на 0,7 °C нижче, ніж у неадаптованої людини (Рис. 4а). В адаптованої людини усталене значення середньої температури шкіри = 34,6 °C, що теж істотно нижче, ніж у неадаптованої, де $T_{sk} = 36,5$ °C (Рис. 4б).

Перегрівання і зневоднення у спортсменів під час марафону. Під час марафону серцевий викид збільшується до 35 л/хв, ударний об'єм серця до 175 мл, швидкість крові у м'язах збільшується до 28 л/хв, що складає 80 % серцевого викиду. У розглянутому діапазоні температур повітря внутрішня температура тіла спортсмена до закінчення дистанції залишається в межах 38,5 °С, що відповідає легкому ступеню перегрівання.

Результати моделювання показують, що за температури повітря 16 °С тіло спортсмена віддає у навколишнє середовище шляхом конвекції 51 % (461 ккал/год), випаровуванням поту відводиться 43 % (386 ккал/год) тепла, а решта 6 % припадає на випромінювання. Зі зростанням температури навколишнього середовища потовиділення з подальшим випаровуванням збільшується, а тепловіддача конвекцією, навпаки, зменшується (Рис. 5а). За температури повітря 20 °С організм людини віддає в середовище шляхом випаровування близько 55 % тепла, а за температури повітря 24 °С – 68 % тепла.

Загальні втрати води організмом спортсмена за температури повітря 16 °С, 20 °С і 24 °С склали 1,4 л, 1,8 л і 2,2 л відповідно за 2,1 години, що становить 2 %, 2,5 % і 3,1 % від маси тіла (Рис. 5б). Ці втрати води не загрожують здоров'ю людини, але негативно впливають на можливість підтримання нею постійної високої швидкості бігу, чим погіршують результативність.

Прогнозування часу до настання переохолодження організму людини залежно від рівня занурення в холодну воду. Порівнювали термofізіологічний стан людини у разі трьох рівнів занурення у воду температурою 10 °С: 1 — повне занурення, 2 — по шию, 3 — голова і руки на повітрі (Рис. 6).

У холодній воді температура мозку стрімко падає для всіх трьох рівнів занурення [8].

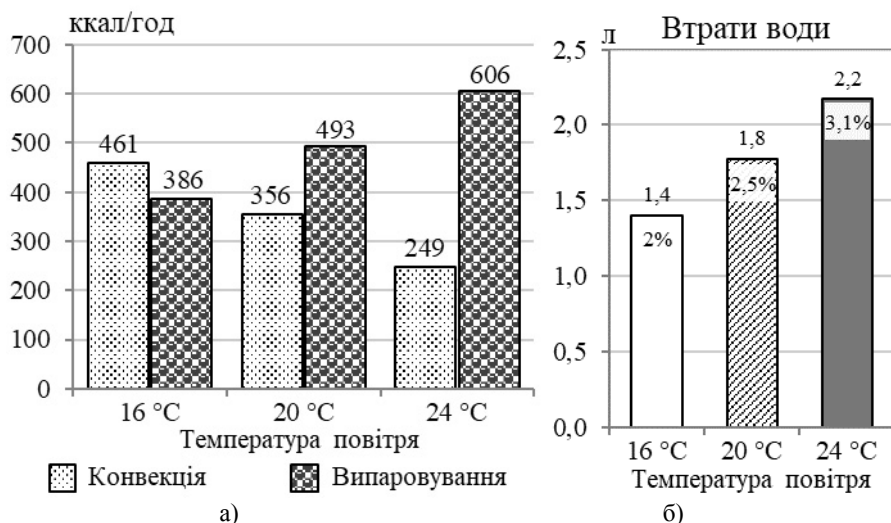


Рис. 5. Теплообмін із середовищем випаровуванням і конвекцією (а) та загальні втрати води організмом спортсмена за дистанцію (б) залежно від температури повітря

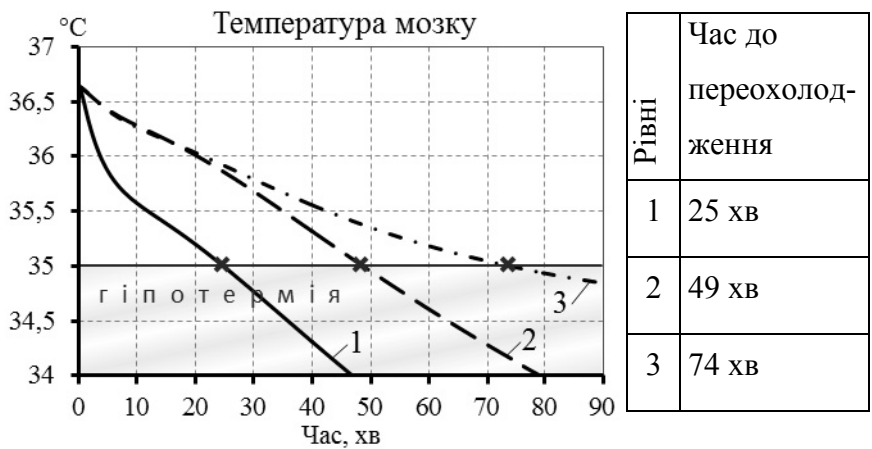


Рис. 6. Динаміка температури мозку залежно від рівня занурення людини у воду: 1 — повне, 2 — по шию, 3 — голова і руки на повітрі

Таблиця 1. Оцінювання температурного комфорту людини у приміщенні з однаковою (А) і різною (В) температурою поверхонь

Приміщення	«А»	«В»
Середня радіаційна температура	23,1 °C	10,8 °C
Середня температура шкіри	35,3 °C	32,3 °C
Індекс PMV	0	-2,8
Індекс PPD	7,5 %	87,9 %
Висновок	комфортно	дуже холодно

PMV — Predicted Mean Vote — очікуване значення теплового комфорту; PPD — Predicted Percentage of Dissatisfied — прогнозована незадоволеність у відсотках [9].

У разі непередбачуваного потрапляння людини у холодну воду за умови положення тіла, коли є змога утримувати голову і руки на повітрі, час безпечного перебування втричі більший, ніж у разі повного занурення у воду з головою.

Оцінювання температурного комфорту людини в приміщенні під час професійної діяльності. Умови проведених модельних досліджень: людина протягом 2 годин працює за комп'ютером у кімнаті висотою 3 м, довжиною 10 м і шириною 4 м, температура повітря 20°C, відносна вологість 50% і швидкість руху повітря 0,1 м/с. Проведено порівняння стану людини у приміщенні з однаковою температурою поверхонь 22 °C (А) і з температурною неоднорідністю (В): підлога = 9 °C, стеля = 11 °C, стіни = 14 °C, 12 °C, 10 °C і 8 °C.

За результатами моделювання (Табл. 1) робота людини у приміщенні «А» є комфортною. У приміщенні «В» спостерігається порушення теплового комфорту.

Прогнозування впливу на людину характеристик електромагнітного випромінювання в радіочастотному діапазоні. Інформаційна система дає змогу отримати попередній розрахунок температурного поля опромінення злоякісних новоутворень та прилеглих тканин. Основними тепловими процесами є розподіл абсорбованого тканинами тепла внаслідок електромагнітного випромінювання. Основний внесок у перенесення тепла від зони безпосереднього нагріву є процес конвективного перенесення тепла кров'ю в організмі людини. За загальної гіпертермії особливе значення має контроль температури мозку та рівня тепловіддачі випаровуванням з поверхні шкіри, а за локальної — процес кондукції [10].

ВИСНОВКИ

Застосування створеної інформаційної системи моделювання термофізіологічного стану людини забезпечує виконання великого класу завдань, пов'язаних з оцінюванням одночасного впливу на людину різноманітних екстремальних умов: високі та низькі температури середовища, вологе та сухе повітря, пронизливий вітер, інтенсивна фізична активність, перебування у холодній воді, паронепроникний захисний одяг, довгохвильова та короткохвильова сонячна радіація, температурна неоднорідність приміщення, вплив електромагнітних полів тощо.

За результатами моделювання розроблена інформаційна система надає можливість отримати попередні рекомендації щодо: фізіологічних резервів організму і небезпеки їхнього вичерпання; можливих ризиків погіршення функціонального стану людини (перегрівання, зневоднення або переохолодження організму людини); часу безпечного перебування людини у заданих умовах середовища; температурного комфорту людини у приміщенні під час професійної діяльності; впливу випромінювання мобільного телефону на температуру мозку людини; впливу загальної, регіональної та локальної електромагнітної гіпертермії на людину у радіочастотному діапазоні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Enescu D. Models and Indicators to Assess Thermal Sensation Under Steady-State and Transient Conditions. *Energies*. 2019. Vol. 12, Iss. 5. № 841. P. 1-43.
2. Ермакова И.И. Информационная платформа мультикомпарментальных моделей терморегуляции человека. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2013. Вып. 174. С. 81–91.
3. Potter A.W., Yermakova I.I., Hunt A.P., Hancock J.W., Oliveira A.V.M., Looney D.P., Montgomery L.D. "Comparison of two mathematical models for predicted human thermal responses to hot and humid environments." *Journal of Thermal Biology*, 2021, vol. 97, 102902.
4. ISO 7726:1998. Ergonomics of the thermal environment — Instruments for measuring physical quantities. *International Organisation for Standardisation*. Geneva: ISO Standard. 1998. P. 1–54.
5. Yermakova I., Nikolaienko A., Grigorian A. Dynamic model for evaluation of risk factors during work in hot environment. *Journal of Physical Science and Application*. USA: David Publishing Company. 2013. Vol. 3. № 4. P. 238–243.
6. Belding H.S., Hatch T.F. Index for evaluating heat stress in terms of resulting physiological strains. *Heating, piping and air conditioning*. 1955. Vol. 27. № 8. P. 129–136.
7. Sawka M.N., Cheuvront S.N., Kenefick R. Hypohydration and human performance: impact of environment and physiological mechanisms. *Sports Medicine*. 2015. Vol. 45. № 1. P. 51–60.

8. Yermakova I., Nikolaienko A., Solopchuk Y., Regan M. Modelling of human cooling in cold water: effect of immersion level. *Extreme Physiology & Medicine* 2015, 4(Suppl 1):A132.
9. ISO 7730:2005. Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Geneva: ISO Standard. 2005. P. 1–52.
10. Gandhi O., Yermakova I., Tadeieva J., Nikolaienko A. Computer Modeling of Human Thermoregulation for Electromagnetic Hyperthermia. *2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Kiev, Ukraine. April 16-28, 2019. P. 475–479.

Отримано 15.02.2022

REFERENCES

1. Enescu D. Models and Indicators to Assess Thermal Sensation Under Steady-State and Transient Conditions. *Energies*. 2019, Vol. 12, Iss. 5, № 841, pp. 1–43.
2. Yermakova I. Information platform of multicompartmental models of human thermoregulatory system. *Kibernetika i vyčislitel'naâ tehnika*. 2013, Vol. 174, pp. 81–91. (in Russian)
3. Potter A.W., Yermakova I.I., Hunt A.P., Hancock J.W., Oliveira A.V.M., Looney D.P., Montgomery L.D. “Comparison of two mathematical models for predicted human thermal responses to hot and humid environments.” *Journal of Thermal Biology*, 2021, vol. 97, 102902.
4. ISO 7726:1998. Ergonomics of the thermal environment — Instruments for measuring physical quantities. *International Organisation for Standardisation*. Geneva: ISO Standard. 1998, pp. 1–54.
5. Yermakova I., Nikolaienko A., Grigorian A. Dynamic model for evaluation of risk factors during work in hot environment. *Journal of Physical Science and Application*. USA: David Publishing Company. 2013, Vol. 3, № 4, pp. 238–243.
6. Belding H.S., Hatch T.F. Index for evaluating heat stress in terms of resulting physiological strains. *Heating, piping and air conditioning*. 1955, Vol. 27, № 8, pp. 129–136.
7. Sawka M.N., Cheuvront S.N., Kenefick R. Hypohydration and human performance: impact of environment and physiological mechanisms. *Sports Medicine*. 2015, Vol. 45, № 1, pp. 51–60.
8. Yermakova I., Nikolaienko A., Solopchuk Y., Regan M. Modelling of human cooling in cold water: effect of immersion level. *Extreme Physiology & Medicine* 2015, 4(Suppl 1):A132.
9. ISO 7730:2005. Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Geneva: ISO Standard. 2005, pp. 1–52.
10. Gandhi O., Yermakova I., Tadeieva J., Nikolaienko A. Computer Modeling of Human Thermoregulation for Electromagnetic Hyperthermia. *2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Kiev, Ukraine. April 16-28, 2019. P. 475–479.

Received 15.02.2022

Yermakova I. Yo., DSc (Biology), Full Professor,
Leading Researcher,
ORCID: 0000-0002-9417-1120, e-mail: irena.yermakova@gmail.com
Nikolaichenko A. Yu., PhD (Engineering),
Senior Researcher,
ORCID: 0000-0002-2402-2947, e-mail: n_nastja@ukr.net
Bogatonkova A.I., PhD (Engineering),
Senior Researcher,
ORCID: 0000-0002-7536-5958, e-mail: bogatonkova@gmail.com
Tadeeva Yu.P., PhD (Engineering),
Senior Researcher,
ORCID: 0000-0001-5418-2848, e-mail: jbest0207@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,
the Department of Complex Research of Information Technologies,
40, Acad. Glushkov av., Kyiv, 03187, Ukraine

MULTIFUNCTIONAL INFORMATION SYSTEM FOR MODELING OF HUMAN THERMOPHYSIOLOGICAL STATE IN EXTREME ENVIRONMENTS

Introduction. Models of human thermoregulation are used for theoretical and experimental findings. Mathematical modeling of human physiological systems is one of the main methods for studying them in parallel with physiological researches in human body. For today, many mathematical models have been developed to predict human physiological responses, but most of them are related to special task.

The purpose of the paper is to develop multifunctional information system for modeling of human thermophysiological state that takes into account comprehensive assessment of impact of extreme conditions in humans.

Results. The information system allows to research different tasks related to assessing the simultaneous impact on humans of various extreme conditions: cold and heat, wet and dry air, high winds, intense physical activity, immersion in cold water, waterproof protective clothing, long-wave and shortwave solar radiation, room temperature inhomogeneity and exposure to electromagnetic field.

Proposed information system enable us to make quantitative evaluations of impact of protective clothing on human thermophysiological state; human adaptation to intense physical activity at hot environment; overheating and dehydration in athletes during the marathon; safe time of hypothermia in cold water; human temperature comfort indoors during professional activity; electromagnetic radiation in the radio frequency ranges.

Conclusions. The information system provides preliminary recommendations to physiological reserves of human, risks of deterioration of functional state (overheating, dehydration or hypothermia), safe stay time in extreme environment, temperature comfort in room during professional activities; effects of general, regional and local electromagnetic hyperthermia in humans of radio frequency ranges.

Keywords: model of human thermoregulation, information technology, physical activity, environmental conditions, protective clothing, temperature comfort, electromagnetic radiation.

DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt207.01.046>

UDC 681.5 CC BY-NC

ЖИТЕЦЬКИЙ Л.С., канд. техн. наук,
в.о. зав. відд. інтелектуальних автоматичних систем
ORCID: 0000-0002-4560-5113, e-mail: leonid_zhiteckii@i.ua
Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних
технологій та систем НАН України і МОН України,
пр. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна

ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Вступ. Удосконалення систем автоматичного керування шляхом їх інтелектуалізації є важливою проблемою як з теоретичної, так і з практичної точок зору. Наявність процесів адаптації та навчання, властивих природному інтелекту, дає змогу розглядати сучасні адаптивні системи та системи, що навчаються, як деякі інтелектуальні системи керування найпростішого типу.

Мета роботи — стисло окреслити результати світового рівня, пов'язані з ефективним адаптивним керуванням і досягнуті у відділі інтелектуальних автоматичних систем Міжнародного науково-навчального центру інформаційних технологій та систем за останні 25 років, а також вказати на проблеми майбутніх досліджень у цій науковій галузі.

Результати. Нова теорія адаптивного керування, яка нещодавно була завершена, є значним досягненням у роботі з системами керування за наявності як параметричної, так і непараметричної невизначеностей. Основною відмінною рисою цієї теорії є те, що вона не вимагає інформації про обмежений набір невідомих параметрів об'єктів та межі довільних невимірних збурень. Використовуючи її методи, можна забезпечити бажані показники якості систем керування з невизначеними об'єктами, тоді як наявні методи стають абсолютно неприйнятними в тій же ситуації.

Висновок. На основі останніх результатів з проблем адаптації та навчання запропоновано зробити наступний крок до створення нових інтелектуальних систем автоматичного керування, що містять складні нелінійні об'єкти. Проте перед впровадженням у практику необхідно розробити нові перспективні методи, які гарантують задовільну поведінку такого класу систем керування, в першу чергу, стійкість цих систем. Ця поки невирішена наукова проблема залишається предметом майбутніх теоретичних досліджень.

Ключові слова: адаптивна система керування, інтелектуальна автоматична система, параметрична і непараметрична невизначеності, невимірювані збурення, складний нелінійний об'єкт.

© ЖИТЕЦЬКИЙ Л.С., 2021

ВСТУП

Так склалося, що 25-річний ювілей Міжнародного науково-навчального центру інформаційних технологій та систем НАН України і МОН України практично збігся з завершенням циклу досліджень у напрямі побудови адаптивних систем автоматичного керування, які виконувалися у відділі інтелектуальних автоматичних систем. Здобутком цих наукових досліджень стало створення цілісної теорії адаптивних автоматичних систем, орієнтованих на функціонування в умовах як параметричних, так і непараметричних невизначеностей відносно математичної моделі об'єкта і характеристик зовнішнього середовища, з яким має взаємодіяти система керування. Саме припущення про відсутність достатньої апріорної інформації про структуру керованого об'єкта та межі можливих значень зовнішніх невимірюваних збурень нестохастичної природи суттєво відрізняє отримані результати цієї теорії від відомих фундаментальних результатів класичної теорії адаптивного керування, які можна знайти, зокрема, в [1–3] і в посиланнях там.

Основні теоретичні результати в галузі адаптивного керування за наявності нестохастичних параметричних і непараметричних невизначеностей підсумовано у вітчизняній монографії [4] та в окремих розділах колективних закордонних монографій [5, 6]. Одним з нових таких результатів виступає розроблений метод адаптації параметрів моделі для керування багатозв'язним об'єктом з кількістю регульованих змінних, що перевищує кількість каналів передачі керувальних дій в умовах, коли параметри такого об'єкта та рівні неконтрольованих збурень апріорі є невідомими [6]. В ідейному плані цей метод спирається на методологію псевдообернення, яка вперше в світі порівняно недавно була запропонована та обґрунтована в роботах [7–10] у розв'язанні низки нових наукових задач керування багатозв'язними об'єктами з виродженими квадратними та прямокутними матрицями коефіцієнтів підсилення.

На думку деяких авторитетних вчених в галузі інтелектуальних інформаційних технологій (ІТ), сформульовану, зокрема, в [11, с. 103], наявність принаймні таких властивостей, як здатність до адаптації та навчання, притаманних природньому інтелекту, дає достатні підстави відносити адаптивні системи автоматичного керування та системи, в яких передбачається навчання цілеспрямованим керувальним діям безпосередньо в процесі самого керування, до першого покоління інтелектуальних автоматичних систем [12]. Деякі результати дослідження процесів функціонування цих систем, до якого були залучені аспіранти відділу, опубліковані в роботі [13].

Інтелектуалізація автоматичних систем природним чином вимагає розроблення нових інтелектуальних інформаційних технологій (ІТ) [14]. Загальна концепція побудови таких ІТ була, як відомо, висунута членом-кореспондентом НАН України В.І. Гриценком ще на початку 90-х років минулого сторіччя [15]. Ця концепція безумовно має бути покладена в основу створення інтелектуальних автоматичних систем нового покоління, здатних ефективніше реалізувати функції контролю і керування технологічними процесами і технічними системами.

Мета роботи — дати в загальних рисах огляд результатів світового рівня стосовно ефективного адаптивного керування, досягнених у відділі інтелектуальних автоматичних систем протягом останніх 25 років, а також вказати на завдання майбутніх наукових досліджень.

ПЕРЕДУМОВИ СТВОРЕННЯ ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ

Одним з пріоритетних напрямів роботи відділу, створеного у свій час у складі Обчислювального центру АН УРСР, було розроблення систем автоматичного керування технологічними процесами та технічними системами, зокрема, автоматичного керування процесами точкового контактного зварювання на базі засобів обчислювальної техніки [16]. Послідовним прихильником побудови цифрових автоматичних систем, а не систем з використанням засобів аналогової обчислювальної техніки, як пропонувалось тоді у фундаментальній монографії [17], був незмінний керівник відділу акад. В.І. Скуріхін. Саме він вперше висунув вельми плідну ідею побудови систем програмного керування на основі обернених математичних моделей.

Ідея методу керування об'єктом за оберненою моделлю [16] у загальних рисах зводиться до такого. Нехай певний динамічний об'єкт має функціонувати у дискретному часі $t = T_0, 2T_0, \dots, nT_0 \dots$ з інтервалом квантування T_0 . Припускається, що його «пряму» модель можна описати різницевою рівнянням

$$y_n + a_1 y_{n-1} + \dots + a_m y_{n-m} = b_1 u_{n-1} + \dots + b_m u_{n-m}, \quad (1)$$

де y_n, u_n — відповідно вихідна змінна та керувальна дія в n -й дискретний момент часу, а $a_1, \dots, a_m, b_1, \dots, b_m$ — параметри об'єкта. Оскільки ж у разі програмного керування в кожний n -й момент часу є відомими майбутні бажані значення $y_{n+1}^0, y_{n+2}^0, \dots$ вихідної змінної y_{n+1}, y_{n+2}, \dots , то з рівняння (1) випливає, що керувальна дія

$$u_n = b_1^{-1} [y_{n+1}^0 + a_1 y_n + \dots + a_m y_{n-m+1} - b_2 u_{n-1} - \dots - b_m u_{n-m+1}], \quad (2)$$

визначена за рівнянням його оберненої моделі, негайно дає $y_n \equiv y_n^0$.

Хоча спершу саму по собі ідею керування за оберненою моделлю не було, на жаль, належним чином сприйнято науковою спільнотою, що займалася проблематикою автоматичного керування, проте вона все ж дала поштовх до розвитку нового напрямку в теорії систем автоматичного керування багатозв'язними об'єктами [18, 19], до якої дещо пізніше і незалежно примкнули й закордонні дослідники [20, сар. 8]. Згодом цей науковий напрям став підґрунтям до створення так званої теорії обернених задач динаміки [21, 22]. Важливо зазначити, що започаткований на евристичному рівні в роботі [18] новий підхід побудови високоефективних систем автоматичного керування за методом, названим у книзі [19] методом оберненого оператора, лише через півтора десятиріччя на математичному рівні обґрунтували закордонні дослідники [23, 24]. Ще більше, виявилось, що до закону (2) при $y_n^0 = y^0 \equiv \text{const}$ формально приводить розв'язок поставленої в роботі [23] оптимізаційної задачі стабілізації лінійного дискретного динамічного об'єкта, який описується рівнянням (1) з доданим до його правої частини членом v_n , що

визначає збурення, обмежене за рівнем $|v_n| \leq \varepsilon < \infty$. Саме цей закон дає змогу придушити геть всі можливі обмежені збурення, забезпечивши мінімум верхньої грані модуля похибки системи керування: $|e_n| := |y^0 - y_n| \leq \varepsilon$.

На жаль, керування за законом (2) можливе, як відомо, якщо тільки дискретний об'єкт є мінімально-фазовим, тобто коли дискретна передавальна функція приведеної неперервної частини об'єкта $W_0(z) = B(z) / A(z)$ з поліномами $A(z) = z^m + a_1 z^{m-1} + \dots + a_m$ і $B(z) = b_1 z^{m-1} + b_2 z^{m-2} + \dots + b_m$ відносно оператора z зсуву вперед на один такт має таку властивість: $B(z) \neq 0$ для всіх $|z| \geq 1$.

Свого часу серед деяких науковців, які працювали у галузі теорії дискретних систем автоматичного керування, панувала думка, що так звану немінімальну фазовість принципово не можна усунути. Проте шляхом наполегливих досліджень уперше в роботі [25] вдалося встановити, що за наявності фіксатора в контурі керування немінімальну фазовість можна все ж уникнути, збільшуючи період квантування T_0 , принаймні у випадку, коли неперервна частина має передавальну функцію $W_0(s) = K / [s(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)]$ з коефіцієнтом підсилення K та сталими часу τ_1, τ_2 . З іншого боку, у дисертації [26] було показано також, що коли $W_0(s) = K / [s(\tau_1 s + 1)]$, то відповідна дискретна передавальна функція

$$W_0(z) = \frac{z-1}{z} Z \left\{ \frac{W_0(s)}{s} \right\}, \quad (3)$$

де $Z\{\cdot\}$ — символ операції z -перетворення, завжди описує мінімально-фазовий дискретний об'єкт незалежно від вибору періоду квантування T_0 . Ці характерні особливості дискретних систем через 20 років після появи роботи [25] підтвердили проф. K.J. Åström зі своїми колегами [27], аналізуючи нулі передавальної функції (3).

Для ефективного програмного керування за наявності немінімально-фазового об'єкта в роботі [28] уперше в світі було запропоновано і обґрунтовано новий метод, який на відміну від відомого тоді методу підвищення порядку астатизму дає змогу забезпечити як завгодно малу за модулем похибку e_n не тільки в усталеному, але й у перехідному режимах. В основу цього методу покладено ідею розкладення оберненої дискретної передавальної функції $(z - z_1)^{-1}$ при $|z_1| > 1$ у ряд за додатними степенями z :

$$(z - z_1)^{-1} = \alpha_{10} + \alpha_{11}z + \alpha_{12}z^2 + \dots + \alpha_{1k}z^k + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_{1k}z^k, \quad (4)$$

де $\alpha_{1k} = -z_1^{-(k+1)}$. Коефіцієнти ряду (4) мають, очевидно, властивість $\alpha_{1k} \rightarrow 0$ при $k \rightarrow \infty$. Спираючись на цю властивість і сам ряд (4), можна реалізувати прямий зв'язок за програмним сигналом $\{y_n^0\}$, що передбачає використання в кожний n -й момент часу інформації про k майбутніх

значень $y_{n+1}^0, y_{n+2}^0, \dots, y_{n+k}^0$ [28]. При цьому належним вибором числа k можна досягти бажаного значення $|e_n|$.

Цікаво, що значно пізніше до того ж самого методу прийшов відомий вчений в галузі автоматичного керування електромеханічними системами проф. М. Tomizuka (університет м. Берклі, Каліфорнія, США) як один з авторів статті [29].

Одночасно з розробленнями ефективних систем програмного керування у відділі проводилися фундаментальні дослідження методу обернених моделей для стабілізації багатозв'язних статичних об'єктів. Основним здобутком проведених у цьому напрямку досліджень стали встановлені у термінах лінійного перетворення матриць необхідні і достатні умови допустимої неадекватності моделі об'єкта, виконання яких гарантує збіжність ітеративних процедур керування за відсутністю збурень. Ці фундаментальні дослідження було завершено публікацією першої монографії [30], підготовленої науковцями відділу.

ПРОБЛЕМИ АДАПТАЦІЇ ТА НАВЧАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Як з'ясувалося [30], можливості керування за фіксованою оберненою моделлю об'єкта суттєво обмежені «розмірами» апіорної невизначеності відносно його параметрів. Тому для побудови автоматичних систем, здатних ефективно функціонувати за наявності не тільки доволі широкої параметричної, але й непараметричної невизначеностей, виникла нагальна потреба у вирішенні деяких досить складних проблем теорії адаптації, яка інтенсивно розвивалася в той час, й навчання таких систем в умовах невизначеностей [1–3, 31]. До них належать: 1) проблема субоптимального та робастного (грубого) адаптивного керування об'єктами (1) з адитивним і, можливо, асиметричним збуренням $v_n \in [\underline{\varepsilon}, \bar{\varepsilon}]$ ($\underline{\varepsilon} \neq -\bar{\varepsilon}$) в умовах, коли апіорна інформація про множину Ω належності вектору $\theta = [a_1, \dots, a_m, b_1, \dots, b_m]^T$ невідомих параметрів та межі $\underline{\varepsilon}$, $\bar{\varepsilon}$ є відсутньою; 2) проблеми побудови адаптивних регуляторів для керування об'єктами за його редукованою (простою) лінійною моделлю; 3) проблема навчання автоматів цілеспрямованим діям безпосередньо в процесі керування об'єктом.

В рамках вирішення проблеми 1) в роботі [32] уперше в світі було запропоновано метод адаптивного субоптимального керування мінімально-фазовим об'єктом за наявності параметричних і непараметричних невизначеностей відносно $\theta, \underline{\varepsilon}, \bar{\varepsilon}$, який на відміну від [30] не вимагає апіорних відомостей ні про межі області Ω , ні про «середнє» значення $v^0 = (\underline{\varepsilon} + \bar{\varepsilon})/2$ (що особливо важливо). В ідейному плані цей метод зводиться ось до чого. В процесі адаптивного керування за законом

$$u_n = b_1^{-1}(n)[y^0 + a_1(n)y_n + \dots + a_m(n)y_{n-m+1} - b_2(n)u_{n-1} - \dots - b_m(n)u_{n-m+1} - v_n^0],$$

що виступає як деяка модифікація стандартного закону керування [3, гл. 4], здійснюється або адаптація розширеного вектора $\theta'_n = [\theta_n^T, v_n^0]^T$ до

невідомого $\theta' = [\theta^T, v^0]^T \in \mathbf{R}^{2m+1}$ за стандартною рекурентною процедурою, розробленою в [3, гл. 3], при $\varepsilon_n = \varepsilon_{n+1}$, де ε_n – поточна оцінка невідомого $\varepsilon = (\bar{\varepsilon} - \underline{\varepsilon}) / 2$, або ж у певний момент $n = n_k$ ця оцінка уточнюється і реконструюється гіпотетична апостеріорна множина Ω'_{n_k} , до якої «потенційно» має належати θ' . Остання визначається як

$$\Omega'_{n_k} = \bigcap_{i=n_k}^{n_k+2m+1} S_i, \quad S_i = \{\hat{\theta}' : |y_i - \hat{\theta}'^T \varphi'_{n-1}| \leq \varepsilon_i\},$$

де S_i — смуга у просторі векторів $\hat{\theta}' \in \mathbf{R}^{2m+1}$, побудована в i -й момент часу, а $\varphi'_n = [-y_n, \dots, -y_{n-m+1}, u_n, \dots, u_{n-m+1}, 1]^T$ — поточний розширений вектор стану. При цьому приймається $n = n_k$, $\varepsilon_{n_k} = \varepsilon_{n_k} + \delta$, коли певним чином вдалося встановити, що $\theta' \notin \Omega'_{n_k-1}$; тут $\delta > 0$ — достатньо мале число, яке має вибиратися конструктором системи і грає роль показника її субоптимальності, а $\Omega' := \Omega \times \{v^0\}$.

Реалізація запропонованого методу передбачає взаємодію між собою блоків точкового оцінювання рівнів збурення та множинного оцінювання невідомих параметрів об'єкта та невідомої величини v^0 , а також передавання сигналів від цих блоків до адаптора для точкового оцінювання вказаних величин. Саме наявність цих двох нових функційних блоків відрізняє показану на рис. 1 структурну схему синтезованої системи від стандартної схеми, що розглядалась у класичній теорії адаптивного керування на базі точкових оцінок θ_n [2, 3].

Аби здійснити простіше, а саме робастне адаптивне керування багатозв'язним статичним об'єктом з обмеженими збуреннями невідомих рівнів за алгоритмом на кшталт алгоритму в [33], в рамках методу обернених моделей побудовано новий алгоритм [34], який на відміну від [33] не вимагає знань ні нижніх меж коефіцієнтів підсилення об'єкта, ні знаків цих коефіцієнтів.

Задача адаптивного керування немінімально-фазовим об'єктом типу (1) виявляється значно складнішою. Справа в тому, що відомі умови дисипативності (граничної обмеженості всіх сигналів системи), встановлені в свій час у монографіях [2, Key Technical Lemma] й [3, теорема 4.П.3], тут непридатні. Тим не менш, в роботі [35] вдалося розв'язати задачу адаптивного керування неперервним немінімально-фазовим об'єктом за наявного обмеженого збурення невідомого рівня. Таку ж задачу, але в дискретному часі було послідовно розв'язано автором в рамках концепцій точкового та множинного оцінювання [36, 37].

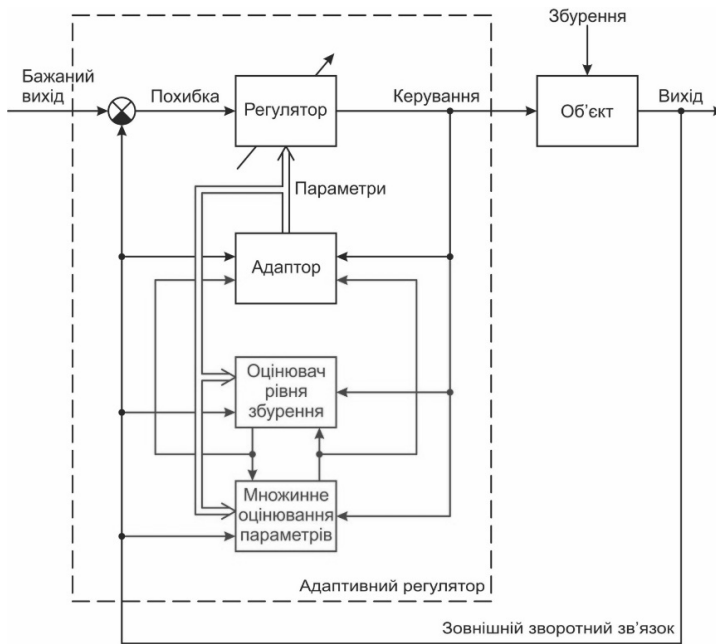


Рис. 1. Конфігурація адаптивної системи керування за наявності параметричної і непараметричної невизначеності

Один з підходів до вирішення проблеми 2) спирається на опис об'єкта рівнянням у формі [38, 39]

$$A^0(E)y_n = B^0(E)u_n + \eta_n + v_n \quad (Ex_n := x_{n-1}). \quad (5)$$

Тут $A^0(z^{-1})$ і $B^0(z^{-1})$ — поліноми деякої фіксованої степені, відносно оператора z^{-1} зсуву назад на один такт, що визначають структуру і параметри редукованої моделі об'єкта; η_n — змінна, яку прийнято тепер називати операторним збуренням; v_n — координатне обмежене за рівнем збурення. При цьому змінна $\omega_n = \eta_n + v_n$ виконує роль складника, який описує так звану немодельовану динаміку, що з'являється як результат керування об'єктом за його редукованою моделлю. Використовуючи загальне рівняння (5), в роботі [38] вдалося встановити нові умови робастності адаптивних систем керування з немодельованою динамікою, які на відміну від [39] дали значно менш консервативну оцінку допустимої непараметричної невизначеності.

У рамках проблематики 2) науковці відділу розробили нові методи й алгоритми адаптації дискретних ПІД-регуляторів до об'єктів, що описується рівняннями високого порядку [40, 41]. Зокрема, уперше в світі було розв'язано задачу керування нескінченно-вимірним об'єктом з довільним невимірюваним збуренням з використанням адаптивного ПІД-регулятора, що важливо з практичної точки зору [40]. Протягом 2000—2001 рр. роботи у цьому напрямі продовжувалися спільно з вченими зі США, Греції та Інституту космічних досліджень НАН України та НКА України за підтримки гранту НАТО на виконання фундаментальних досліджень у галузі теорії

нелінійних адаптивних систем керування. Ці роботи було завершено встановленням умов, виконання яких теоретично гарантує можливість адаптивної стабілізації певного класу нелінійних дискретних динамічних об'єктів на основі простих лінійних регуляторів [42, 43].

Результатом вирішення проблеми 3) стали нові методи навчання регуляторів цілеспрямованим діям безпосередньо у процесі керування [4, гл. 6]. Характерною особливістю цих методів є те, що навчені регулятори мають допускати до керування об'єктом лише за певних умов, які унеможливають виникнення значних відхилень вихідних змінних об'єкта від бажаних значень на етапі автоматичного керування об'єктом.

Отримані в рамках створеної теорії адаптивних систем керування з параметричними і непараметричними невизначеностями [4] фундаментальні результати проходили ретельну міжнародну експертизу у кількох визнаних наукових центрах світу і неодноразово доповідались на міжнародних конгресах, конференціях, симпозіумах, які протягом останніх 25 років відбувалися в Японії (1997 р.), Республіці Корея (1997 р.), Великій Британії (1998 р.), Китаї (1999 р.), Португалії (2001 р.), Іспанії (2002 р.), Італії (2011 р.), Південноафриканській республіці (2014 р.), Франції (2017 р.), і схвалені зарубіжними вченими.

У практичному плані розроблені у відділі нові методи та алгоритми адаптації і навчання було успішно впроваджено або рекомендовано до впровадження у складі систем автоматичного керування неперервними технологічними процесами [44].

ПЕРСПЕКТИВИ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ

Наразі ідеї адаптивного керування за математичними моделями в аналітичній формі можна вважати вичерпаними. Водночас нові можливості для підвищення ефективності функціонування систем автоматичного керування відкривають інтелектуальні ІТ [15]. Вони дають змогу формувати керувальні дії не за аналітичною моделлю об'єкта, а за знаннями, накопиченими в процесі спостереження за неформальними діями досвідченої людини-оператора. Інші можливості формування керувальних дій пов'язані з ідеями нейромережної ІТ оброблення сигналів, асоціативної пам'яті [14], а також розпізнавання ситуацій, що можуть спостерігатися безпосередньо у процесі керування. Роботи у цих напрямках мають дати підґрунтя для створення теорії інтелектуальних систем автоматичного керування. Однією з таких нещодавно завершених робіт стало дослідження асимптотичних властивостей процесів навчання нейронної мережі як моделі об'єкта. Результати цього дослідження, проведеного у відділі інтелектуальних автоматичних систем спільно з кафедрою аерокосмічних систем управління Національного авіаційного університету, опубліковано в одному з американських періодичних видань [45].

ВИСНОВОК

На основі останніх результатів з вирішення проблем адаптації та навчання запропоновано зробити наступний крок до створення нових інтелектуальних систем автоматичного керування, які містять складні нелінійні об'єкти. Проте перед впровадженням у практичне застосування

необхідно розробити нові перспективні методи, які гарантують задовільну поведінку замкнених систем керування, в першу чергу, стійкість цих систем. Ця поки невирішена наукова проблема залишається предметом майбутніх теоретичних досліджень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кунцевич В.М. *Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации*. К.: Наук. думка, 2006. 264 с.
2. Goodwin G.C., Sin K.S. *Adaptive filtering, prediction and control*. Engewood Cliffs, NJ.: Prentice-Hall, 1984. 540 p.
3. Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Якубович В.А. *Адаптивное управление динамическими объектами*. Москва: Наука, 1981. 448 с.
4. Житецький Л.С., Скурихин В. И. *Адаптивные системы управления с параметрическими и непараметрическими неопределенностями*. К.: Наук. думка, 2010. 301 с.
5. Zhiteckii L.S. An open problem in adaptive nonlinear control theory. *Unsolved Problems in Mathematical Systems and Control Theory* / V.D. Blondel and A. Megretski, eds. Princeton, USA: Princeton University Press. 2004. P. 229-237.
6. Zhiteckii L.S., Solovchuk K.Yu. Robust Adaptive controls for a class of nonsquare memoryless systems. *Advanced Control Systems: Theory and Applications* / Y.P. Kondratenko, V.M.. Kuntsevich, A.A. Chikrii, V.F. Gubarev, eds. Gistrup: River Publishers 2021, P. 203–226.
7. Гриценко В.И., Житецький Л.С., Соловчук К.Ю. Предельные возможности метода псевдообращения для управления линейными многосвязными объектами без памяти: гарантированные результаты. *Доповіді НАН України*. 2019. №8. С. 16–24.
8. Скурихин В.И., Гриценко В.И., Житецький Л.С., Соловчук К.Ю. Метод обобщенного обратного оператора в задаче оптимального управления линейными многосвязными статическими объектами. *Доповіді НАН України*. 2014. №8. С. 57–66.
9. Zhiteckii L.S., Skurikhin V.I., Solovchuk K.Yu. Stabilization of a nonlinear multivariable discrete-time time-invariant plant with uncertainty on a linear pseudoinverse model. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2017. N 5. P. 12–26.
10. Zhiteckii L.S., Solovchuk K.Yu. Pseudoinversion in the problems of robust stabilizing multivariable discrete-time control systems of linear and nonlinear static objects under bounded disturbances. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2017. N 3. P. 57–70.
11. Файнзильберг Л.С. Интеллектуальная информационная технология обработки сигналов с локализованной информацией. *Искусственный интеллект*. 2008. №2. С. 100–110.
12. Тимофеев А.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные системы автоматического управления. *Техническая кибернетика*. 1994. № 5. С. 211–223.
13. Zhiteckii L.S., Nikolaienko S.A., Solovchuk K.Yu. Adaptation and learning in some classes of identification and control systems. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2015, № 181. С. 47–65.
14. *Интеллектуальные системы автоматического управления* / под ред. И.М. Макарова и Р.М. Юсупова. Москва: Физматгиз, 1991. 576 с.
15. Гриценко В.И. Интелектуалізація інформаційних технологій. *Наука і технології*. К.: Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, 1992. С. 4–9.
16. Скурихин В.И., Никулин В.Н., Дрымалык Я.П. Вычислительные устройства в схемах контактной сварки. *Вопросы вычислительной техники*. К.: Гос. изд-во технической литературы УССР, 1961. С. 105–113.
17. Фельдбаум А.А. *Вычислительные устройства в автоматических системах*. Москва: Физматгиз, 1959. 798 с.
18. Жук К.Д., Пятенко Т.Г., Скурихин В.И. Вопросы синтеза управляющих моделей в многосвязных автоматических системах. *Методы математического моделирования и теория электрических цепей*: Тр. семинара. К.: Изд-во АН УССР, 1964. С. 3–17.

19. Пухов Г.Е., Жук К.Д. *Синтез многосвязных систем управления по методу обратных операторов*. К. : Наук. думка, 1966. 218 с.
20. Lee T., Adams G., Gaines W. *Computer process control: modeling and optimization*. NY : Wiley, 1968. 312 p.
21. Lyubchik L.M. Inverse model control and subinvariance in linear discrete multivariable systems. *3rd European Control Conf.* Roma, 1995. Vol. 4, part 2. P. 3651–3659.
22. Крутько П.Д. *Обратные задачи динамики управляемых систем: линейные модели*. Москва: Наука, 1987. 304 с.
23. Якубович Е.Д. Решение одной задачи оптимального управления дискретной линейной системой. *Автоматика и телемеханика*. 1975. №9. С. 73–79.
24. Vidyasagar M. Optimal rejection of persistent bounded disturbances. *IEEE Trans. Autom. Control*. 1986. Vol. 31. P. 527–535.
25. Житецкий Л.С. Про одну задачу синтеза системы программного керування, яка містить цифровий обчислювальний пристрій. *Автоматика*. 1964. №5. С. 36–42.
26. Житецкий Л.С. *Вопросы компенсации динамических ошибок цифровых систем программного управления* : дис. канд. тех. наук. К.: 1968. 186 с.
27. Åström K.J., Hagander P., Sternby J. Zeros of sampled systems. *Automatica*. 1984. Vol. 20, N 1. P. 31–38.
28. Житецкий Л.С. Про інваріантність комбінованих імпульсних систем программного керування. *Автоматика*. 1967. №6. С. 83–85.
29. Gross E., Tomizuka M. Experimental flexible beam tip tracking control with a truncated series approximation in uncancelable inverse dynamics. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 1994. N 2(4). P. 382–391.
30. Скурихин В. И., Житецкий Л. С., Проценко Н. М. *Итеративно-табличные автоматы*. К.: Наук. думка, 1977. 165 с.
31. Бондарко В.А. Адаптивное субоптимальное управление решениями линейных разностных уравнений. *Доклады АН СССР*. 1983. № 2. С. 301–303.
32. Zhitetskij L.S. Adaptive control of systems subjected to bounded disturbances. *Bounding Approaches to System Identification* / M. Milanese etc., eds. New York, London: Plenum Press, 1996. Chapt. 24. P. 383–407.
33. Feng G. A robust discrete-time direct adaptive control algorithm. *Systems and Control Letters*. 1994. Vol. 22. P. 203–208.
34. Zhitetskij L. S. Adaptive control under conditions of the presence of disturbances: an identification approach. *Problemy Upravleniya i Informatiki*. 1996. N 6, P. 66 – 77.
35. Suarez D.A., Lozano R. Adaptive control of nonminimum phase systems subject to unknown bounded disturbances. *IEEE Trans. Automat. Control*. 1996. N 12. P. 1830–1836.
36. Zhiteckij L.S. Adaptive control of nonminimum phase systems in the presence of bounded disturbance with unknown bound. *Proc. 3rd European Control Conf.* (Roma, Italy, 5–8 Sept., 1995). 1995. Vol. 3. P. 891–896.
37. Zhiteckij L S. Solution of dissipativity problem for adaptive control system of nonminimum phase plant based on set-membership estimation method. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2001. N 33. P. 59–69.
38. Zhitetskij L.S. Robustness conditions of adaptive control systems with parametric and nonparametric uncertainties. *Journal of Automation and Information Sciences*. 1997. N 3. P. 41–51.
39. Kreisselmeier G., Anderson B.D.O. Robust model reference adaptive control. *IEEE Trans. Automat. Control*. 1986. AC–31. N 2. P. 127–133.
40. Zhiteckij L.S., Skurikhin V.I., Tyupa O.V., Sapunova N.A. Adaptive discrete-time PID control algorithm for controlling infinite-dimensional systems. *Proc. European Control Conference ECC-2001* (Porto, Portugal, September 4–7, 2001), 2001. P. 184–189.
41. Zhiteckij L.S., Skurikhin V. I., Tyupa O. V Tuning and self-tuning of discrete-time PID controllers based on model reduction approach. *Proc. IFAC Workshop on Digital Control: Past, Present and Future of PID Control* (Terrassa, Spain, April 5–7, 2000), 2000. P. 167–172.
42. Zhiteckii L.S. Robust control of some classes of nonlinear discrete-time plants using linear controllers. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2016. N 48. P. 383–407.

43. Zhiteckij L.S. Singularity-free stable adaptive control of a class of nonlinear discrete-time systems. *Proc. 15th IFAC World Congress* (Barcelona, Spain, July 21–26, 2002), 2002. P. 475–480.
44. Скурихин В.И., Житецкий Л.С. Управление термо- и массообменными процессами с использованием настраиваемых моделей: практические примеры. *Управляющие системы и машины*. 2002. № 6. С. 77–84.
45. Zhiteckij L.S., Azarskov V.N., Nikolaienko S.A., Solovchuk K.Yu. Some features of neural networks as nonlinearly parameterized models of unknown systems using an online learning algorithm. *Journal of Applied Mathematics and Physics*. Jan. 2018. N 06(01). P. 247–263.

Отримано 21.03.2022

REFERENCES

1. Kuntsevich V.M. *Control under uncertainty: guaranteed results in management and identification problems*. Kyiv: Nauk. dumka, 2006, 264 p. (in Russian).
2. Goodwin G.C., Sin K.S. *Adaptive filtering, prediction and control*. Engewood Cliffs, NJ: Pren-tice-Hall, 1984, 540 p.
3. Fomin V.N., Fradkov A.L., Yakubovich V.A. *Adaptive control of dynamic plants*. Moscow: Nauka, 1981, 448 p (in Russian).
4. Zhiteckij L.S., Skurikhin V.I. *Adaptive control systems with parametric and nonparametric uncertainties*. Kyiv: Nauk. dumka, 2010, 301 p. (in Russian).
5. Zhiteckij L.S. An open problem in adaptive nonlinear control theory. In *Unsolved Problems in Mathematical Systems and Control Theory*. V.D. Blondel and A. Megretski (Eds). Princeton, USA: Princeton University Press. 2004. P. 229–237.
6. Zhiteckij L.S., Solovchuk K.Yu. Robust Adaptive controls for a class of nonsquare memoryless systems. In *Advanced Control Systems: Theory and Applications*. Y.P. Kondratenko, V.M. Kuntsevich, A.A. Chikrii, V.F. Gubarev (Eds). Gistrup: River Publishers 2021, P. 203–226.
7. Gritsenko V.I., Zhiteckij L.S., Solovchuk K.Yu. Limitations of pseudo inverse method for control of linear interconnected memoryless plants: guaranteed results. *Dopovidi NAN Ukrainy*. 2019, No. 8, pp. 16–24 (in Russian).
8. Skurikhin V.I., Gritsenko V.I., Zhiteckij L.S., Solovchuk K. Yu. Generalized inverse operator method in the problem of optimal controlling linear interconnected static plants. *Dopovidi NAN Ukrainy*. 2014, No. 8, pp. 57–66 (in Russian).
9. Zhitetskii L. S., Skurikhin V. I., Solovchuk K.Yu. Stabilization of a nonlinear multivariable discrete-time time-invariant plant with uncertainty on a linear pseudoinverse model. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2017, No. 5, pp. 12–26.
10. Zhiteckij L. S., Solovchuk K. Yu. Pseudoinversion in the problems of robust stabilizing multivariable discrete-time control systems of linear and nonlinear static objects under bounded disturbances. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2017, No. 3, pp. 57–70.
11. Fainzilberg L.S. Intelligent information technology for processing of signals with localized information. *Shtuchnyi intelekt*. 2008, No. 2, pp. 100–110 (in Russian).
12. Timofeev A.V., Yusupov R.M. Intelligent automatic control systems. *Technicheskaya kibernetika*. 1994, No. 5, pp. 211–223 (in Russian).
13. Zhiteckij L. S., Nikolaienko S. A., Solovchuk K. Yu. Adaptation and learning in some classes of identification and control systems. *Kibernetika i vychislitel'naya tekhnika*. 2015, No. 181, pp. 47–65.
14. *Intelligent automatic control systems* / I.M. Makarov and R.M. Yusupov (Eds). Moscow: State press for physics and mathematical literature, 1991, 576 p. (in Russian).
15. Gritsenko V.I. Intellectualization of information technologies. *Nauka i tehnologiyi*. Kyiv: V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine, 1992, pp. 4–9 (in Ukrainian).
16. Skurikhin V.I., Nikulin V.N., Drymalyk Ya.P. Computing devices in contact welding schemes. *Voprosy vychislitel'noy tekhniki*. Kyiv: State press for technical literature of the Ukrainian SSR, 1961, pp. 105–113 (in Russian).
17. Fel'dbaum A.A. *Computing devices in automatic systems*. Moscow: State press for physics and mathematical literature, 1959, 798 p. (in Russian).

18. Zhuk K.D., Pyatenko T.G., Skurikhin V.I. Problems of the synthesis of control models in interconnected automatic systems. *Methods for mathematical modeling and the theory of electrical chain*: Proc. of the workshop. Kyiv: Press of the AS of Ukrainian SSR, 1964, pp. 3–17 (in Russian).
19. Pukhov G.Ye., Zhuk K.D. *Synthesis of multiconnected control systems by the method of inverse operators*. Kyiv: Nauk. dumka, 1966, 218 p. (in Russian).
20. Lee T., Adams G., Gaines W. *Computer process control: modeling and optimization*. NY: Wiley, 1968, 312 p.
21. Lyubchik L.M. Inverse model control and subinvariance in linear discrete multivariable systems. *3rd European Control Conf.* Roma, 1995, Vol. 4, part 2, pp. 3651–3659.
22. Krut'ko P.D. *Inverse problems of control system dynamics: linear models*. Moscow: Nauka, 1987, 304 p. (in Russian).
23. Yakubovich Ye.D. Solving one problem of optimal control for a discrete linear system. *Automatika i telemekhanika*. 1975, No. 9, pp. 73–79 (in Russian).
24. Vidyasagar M. Optimal rejection of persistent bounded disturbances. *IEEE Trans. Autom. Control*. 1986, Vol. 31, pp. 527–535.
25. Zhiteckij L.S. On a problem of synthesis of a program control system containing a digital computer. *Avtomatika*. 1964, No. 5, pp. 36–42 (in Ukrainian).
26. Zhiteckij L.S. Problems of dynamic errors compensation in digital program control systems: *PhD Thesis*. Kyiv, 1968, 186 p. (in Russian).
27. Åström K.J., Hagander P., Sternby J. Zeros of sampled systems. *Automatica*. 1984, Vol. 20, No. 1, pp. 31–38.
28. Zhiteckij L.S. On the invariance of sampled combined program systems. *Avtomatika*. 1967, No. 6, pp. 83–85 (in Ukrainian).
29. Gross E., Tomizuka M. Experimental flexible beam tip tracking control with a truncated series approximation in uncanceled inverse dynamics. *IEEE Trans. on Control Systems Technology*. 1994, No. 2(4), pp. 382–391.
30. Skurikhin V.I., Zhiteckij L.S., Protsenko N.M. *Iterative table automata*. Kyiv: Nauk. dumka, 1977, 165 p. (in Russian).
31. Bondarko V.A. Adaptive suboptimal control of solutions of linear difference equations. *Doklady AN SSSR*. 1983, No. 2, pp. 301–303 (in Russian).
32. Zhiteckij L.S. Adaptive control of systems subjected to bounded disturbances. In *Bounding Approaches to System Identification*. M. Milanese etc. (Eds). New York, London: Plenum Press, 1996, Chapt. 24, pp. 383–407.
33. Feng G.A. robust discrete-time direct adaptive control algorithm. *Systems and Control Letters*. 1994, Vol. 22, pp. 203–208.
34. Zhitetskij L. S. Adaptive control under conditions of the presence of disturbances: an identification approach. *Problemy Upravleniya i Informatiki*. 1996. No. 6, pp. 66 – 77.
35. Suarez D.A., Lozano R. Adaptive control of nonminimum phase systems subject to unknown bounded disturbances. *IEEE Trans. Automat. Control*. 1996, No. 12, pp. 1830–1836.
36. Zhiteckij L.S. Adaptive control of nonminimum phase systems in the presence of bounded disturbance with unknown bound. *Proc. 3rd European Control Conf.* (Roma, Italy, 5–8 Sept., 1995), 1995, Vol. 3, pp. 891–896.
37. Zhiteckij L.S. Solution of dissipativity problem for adaptive control system of nonminimum phase plant based on set-membership estimation method. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2001, No. 33, pp. 59–69.
38. Zhitetskij L.S. Robustness conditions of adaptive control systems with parametric and nonparametric uncertainties. *Journal of Automation and Information Sciences*. 1997, No. 3, pp. 41–51.
39. Kreisselmeier G., Anderson B.D.O. Robust model reference adaptive control. *IEEE Trans. Automat. Control*. 1986, AC–31, No. 2, pp. 127–133.
40. Zhiteckij L.S., Skurikhin V.I., Tyupa O.V., Sapunova N.A. Adaptive discrete-time PID control algorithm for controlling infinite-dimensional systems. *Proc. European Control Conference ECC-2001* (Porto, Portugal, September 4-7, 2001), 2001, pp. 184–189.
41. Zhiteckij L.S., Skurikhin V. I., Tyupa O. V. Tuning and self-tuning of discrete-time PID controllers based on model reduction approach. *Proc. IFAC Workshop on Digital Control: Past, Present and Future of PID Control* (Terrassa, Spain, April 5-7, 2000), 2000, pp. 167–172.

42. Zhiteckii L.S. Robust control of some classes of nonlinear discrete-time plants using linear controllers. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2016, No. 48, pp. 383–407.
43. Zhiteckij L.S. Singularity-free stable adaptive control of a class of nonlinear discrete-time systems. *Proc. 15th IFAC World Congress* (Barcelona, Spain, July 21–26, 2002), 2002, pp. 475–480.
44. Skurikhin V.I., Zhitetskij L.S. Control of thermo– and mass exchange processes by using of adjusted models: practical examples. *Upravlyayushie sistemy i mashiny*. 2002, No. 6, pp. 77–84 (in Russian).
45. Zhiteckii L.S., Azarskov V.N., Nikolaenko S.A., Solovchuk K.Yu. Some features of neural networks as nonlinearly parameterized models of unknown systems using an online learning algorithm. *Journal of Applied Mathematics and Physics*. Jan. 2018, No. 6, pp. 247–263.

Received 21.03.2022

Zhiteckii L.S., PhD (Engineering),
Acting Head of the Department of Intelligent Automatic Systems
ORCID: 0000-0002-4560-5113, e-mail: leonid_zhiteckii@i.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,
40, Acad. Glushkov av., Kyiv, 03187, Ukraine

PROBLEMS AND PROSPECTS FOR THE INTELLECTUALIZATION OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS

Introduction. *The improvement of automatic control systems via their intellectualization is the important problem from both theoretical and practical points of view. The presence of adaptation and learning processes intrinsic to the natural intelligence makes it possible to consider the modern adaptive and learning systems as some intelligent control systems of the simplest type.*

The purpose of the paper is to outline briefly the world-class results related to the efficient adaptive control and achieved in Intelligent Automatic Systems Department during the last 25 years and also to point out on problems of future research in this scientific area.

Results. *A new adaptive control theory which has recently been completed represents the significant achievement to deal with the control systems in the presence of both parameter and nonparameter uncertainties. The main distinguishing feature of this theory is that it requires no information about the constrained membership set of unknown plant parameters and the bounds on arbitrary unmeasurable disturbances. Utilizing its methods, we can ensure the desired performance indices of the control systems with uncertain plants whereas the existing methods become quite unacceptable in the same situation.*

Conclusion. *Based on recent results concerning the adaptation and learning problems, we propose to take the next step toward to novel intelligent automatic control systems containing complex nonlinear plants. However, new perspective methods guaranteeing a perfect behavior of the closed-loop control systems, in particular, the stability of these control systems should be devised before implementing them in practical applications. This as yet unsolved scientific problem remains the subject of future theoretical research.*

Keywords: *adaptive and learning control system, automatic intelligent control system, parameter and nonparameter uncertainties, unmeasured disturbance, complex nonlinear plant.*

DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt207.01.059>

УДК: 004.75+004.932.2:616

CC BY-NC

КОВАЛЕНКО О.С., д-р мед. наук, професор,
зав. відд. медичних інформаційних систем
ORCID 0000-0001-6635-0124, e-mail: askov49@gmail.com

КОЗАК Л.М., д-р біол. наук, старш. наук. співроб.,
пров. наук. співроб., відд. медичних інформаційних систем
ORCID: 0000-0002-7412-3041, e-mail: lmkozak52@gmail.com

НАДЖИФІАН ТУМАНДЖАНІ М.,
наук. співроб., відд. медичних інформаційних систем
e-mail: naji1980bp@yahoo.com,

РОМАНЮК О.О.,
молодш. наук. співроб., відд. медичних інформаційних систем
ORCID:0000-0002-6865-1403, e-mail: ksnksn7@gmail.com
Міжнародний науково-навчальний центр
інформаційних технологій та систем
НАН України та МОН України,
пр. Акад. Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна

ДОСВІД ТА ПЕРСПЕКТИВИ СТВОРЕННЯ МЕДИЧНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПІДТРИМКИ НАДАННЯ МЕДИЧНОЇ ДОПОМОГИ

Вступ. Однією з чотирьох флагманських ініціатив, визначених ВООЗ як пріоритети охорони здоров'я на найближчі 5 років, є Флагманська ініціатива щодо забезпечення можливостей громадян одержувати якісну медичну допомогу із застосуванням засобів цифрової охорони здоров'я. Застосування цифрових медичних технологій для споживачів, медичних працівників, та надавачів медичних послуг слугуватиме зміцненню системи охорони здоров'я, розширенню можливостей пацієнтів та досягнення принципу «здоров'я для всіх».

Мета роботи — узагальнення досвіду та останніх результатів співробітників відділу медичних інформаційних систем Міжнародного центру з дослідження та розроблення медичних інформаційних систем та інформаційних технологій цифрової медицини на тлі загального процесу цифрової трансформації у медичній галузі.

Результати. Визначено основні характеристики та принципи побудови сучасних медичних інформаційних систем (МІС) як складників екосистеми цифрової медицини. Проаналізовано внутрішні та зовнішні інформаційні потоки електронних медичних документів МІС. Для подальшого розмежування репрезентативних атрибутів використаних документів визначимо три подібні, але різні технології, пов'язані з картою пацієнтів: електронні медичні записи (EMR), електронні медичні документи (EHR) та електронний паспорт здоров'я пацієнта (PHR), кожен з цих карток диференційовано на основі рівня орієнтації на пацієнта. Базуючись

на одному з принципів "5Ps medicine" — принципі персоналізації, визначено структуру персонального медичного сховища, яке за сучасними викликами потребують всі учасники інфраструктури цифрової медицини (пацієнти, лікарі, співробітники лабораторій та відділень функціональної діагностики тощо). Для забезпечення взаємозв'язку таких сховищ створено моделі бізнес-процесів акумулювання та обміну цифровими медичними даними та на їхній основі розроблено мобільні застосунки, модулі для акумулювання та обміну цифровими медичними даними між різними користувачами в процесі аналізу діагностичних даних. Проаналізовано взаємодію мобільних застосунків з локальним інформаційним середовищем закладу охорони здоров'я та враховано її особливості у створених спеціалізованих мобільних програмних модулях акумулювання та аналізу персональних медичних даних.

Висновки. Розроблена модель цифрової трансформації в медицині, яка охоплює цифрові методи отримання та аналізу біомедичних сигналів, цифрових медичних зображень, методи формування електронних медичних записів та документів, дала змогу створити методи та засоби побудови екосистеми цифрової медицини з використанням глобальних інтелектуальних ресурсів для забезпечення необхідного рівня для аналізу величезного обсягу інформації та підтримки прийняття рішень лікарями на всіх етапах надання медичної допомоги. Використання розроблених мобільних застосунків акумулювання, аналізу та обміну персональними медичними даними дає змогу здійснювати перегляд накопичених даних, оцінювання та прогнозування стану здоров'я людини за розробленими моделями Data Mining та реалізувати обмін медичними даними різного походження між пацієнтом та лікарем.

Ключові слова: медичні інформаційні системи, екосистеми цифрової медицини, медичні інформаційні технології, мобільні застосунки, класифікаційні моделі Data Mining.

ВСТУП

Сьогодні темпи переходу України до високотехнологічних галузей та ефективних процесів зростають з використанням інформаційно-комунікаційних технологій. У Проєкті глобальної стратегії цифрової охорони здоров'я на період 2020–2025 рр., наданої ВООЗ у 2019 р., визначено головні пріоритети цифровізації медичної сфери та шляхи їх реалізації [1]. Зазначено, що застосування цифрових медичних технологій для споживачів, медичних працівників, надавачів медичних послуг та підприємств — виробників медичних приладів, слугуватиме зміцненню системи охорони здоров'я, розширенню можливостей пацієнтів та втіленню принципу «здоров'я для всіх». Цей пріоритет оголошено також в Європейській програмі роботи на 2020–2025 рр. «Спільні дії для поліпшення здоров'я жителів Європи», де підкреслено, що органи охорони здоров'я повинні гарантувати реалізацію права населення на загальний доступ до якісної допомоги зі зниженням фінансових витрат [2]. Зазначено, що ВООЗ визначає 4 флагманських ініціативи як пріоритети охорони здоров'я на найближчі 5 років, серед яких є Флагманська ініціатива 2 «Розширення прав і можливостей громадян за допомогою цифрової охорони здоров'я», яка надає додаткові інструменти для практичної реалізації проєкту Глобальної стратегії ВООЗ у сфері цифрової охорони здоров'я і активує процес оперативного впровадження інноваційних цифрових рішень, які з'являються в різних країнах Європи.

Співробітники Міжнародного науково-навчального центру інформаційних технологій та систем (Міжнародний центр) за 25 років його діяльності розробили низку інформаційних технологій для системи електронної охорони здоров'я, які спрямовано на реалізацію цифрових методів реєстрації, зберігання, аналізу та обміну медичними даними, що забезпечує інформаційний супровід надання медичної допомоги.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Роботи академіків В.М. Глушкова та М.М. Амосова на початок 60-х років ХХ сторіччя заклали основи розвитку нового напрямку наукових досліджень під назвою «біологічна та медична кібернетика». Медична галузь того часу вкрай потребувала формалізації різномірної медичної інформації для подальшого автоматизованого оброблення. Саме тому першими завданнями медичної інформатики було створення формалізованих історій хвороби та розроблення інформаційного забезпечення окремих блоків медичної інформаційної системи. У 1971 р. результати перших розробок узагальнено у монографії «Медична інформаційна система» за редакції М.М. Амосова та А.О. Попова, в якій було надано підходи до трансформації форм подання медичних даних і організації їхнього автоматизованого оброблення, закладено ідеї розроблення медичних інформаційних систем на основі стандартизованих медичних документів [3]. Академік М.М. Амосов, професор А.О. Попов та його учні розробили перші стандартизовані історії хвороби, що стали зразком для майбутніх електронних медичних записів та документів.

Для підтримки інформаційних процесів у закладах охорони здоров'я створено медичні інформаційні системи (МІС), спрямовані на статистичне оброблення даних і підготування звітів. Паралельно удосконалювалися засоби формалізації медичних записів, що зумовило розроблення спеціальних термінологічних довідників та класифікаторів. Перші МІС створено для підтримки завдань охорони здоров'я на рівні медичного закладу, у їхню основу покладено стандартизовані медичні документи. Розроблювані математичні моделі аналізу медичної інформації лягли в основу створення інформаційних технологій підтримки діяльності лікаря.

Одночасно наперед вийшли завдання обміну медичною інформацією та даними із застосуванням сучасних баз даних як їхніх сховищ. Для цього стали розробляти інформаційні стандарти, які було розвинено у сучасні стандарти для регламентування подання медичної інформації різного виду та здійснення процесів її обміну [4, 5]. Вони надали можливість оптимізувати процеси обміну даними та інформацією, що зробило доступнішою медичну допомогу з одночасним забезпеченням конфіденційності персональних даних. Підвищення доступності медичної допомоги є однією з найвідчутніших переваг цифрових технологій у сфері охорони здоров'я. Досягнення у галузі телемедицини відкрили можливості для надання широкого спектру послуг. Зрозуміло, що пацієнти виграють за використання цих розробок, оскільки вони можуть отримати лікування найвищої якості в будь-який час і в будь-якому місці.

Підкреслимо, що розширення кола завдань створених медичних інформаційних систем посилювало розвиток інформаційних технологій в охороні здоров'я.

З початком ХХІ сторіччя настав новий етап розвитку інформаційних технологій в медицині — цифрова медицина, невід'ємною частиною якої стає електронна охорона здоров'я. Цифрова медицина — це сукупність методів, технологій та технічних засобів комп'ютерної підтримки лікувально-діагностичних процесів, використання яких кардинально підвищує ефективність надання медичної допомоги конкретній особі/пацієнту, а також усьому населенню чи окремій групі населення [6]. Досягнення у сферах

штучного інтелекту, великих даних, робототехніки та машинного навчання продовжують зумовлювати серйозні зміни у цифровій охороні здоров'я, головними структурно-функційними елементами якої є сучасні МІС з реалізацією інтелектуальних інформаційних технологій [7].

Пройшовши важливі етапи свого розвитку, медичні інформаційні системи охоплюють дуже широкий клас систем, від простих, призначених для збирання, зберігання та передавання медичної інформації чи даних, до спеціалізованих модулів з залученням аналітичних інформаційних технологій, які підтримують спеціальні функції, пов'язані з діяльністю системи охорони здоров'я (діагностування, підтримка прийняття рішень лікарями в процесі надання медичної допомоги, оцінювання її якості, підтримка термінологічних систем, тощо).

Метою статті є узагальнення досвіду та останніх результатів співробітників відділу медичних інформаційних систем Міжнародного центру у дослідженнях та розробленнях медичних інформаційних систем та інформаційних технологій цифрової медицини на тлі загального процесу цифрової трансформації у медичній галузі.

МЕДИЧНІ ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ ЯК СКЛАДНИКИ ЕКОСИСТЕМИ ЦИФРОВОЇ МЕДИЦИНИ

Сучасна **медична інформаційна система (МІС)** є організаційно-технічною системою, яка реалізує інформаційні технології підтримки діагностичного і лікувального процесів та передбачає апаратне, програмне та інформаційне забезпечення надання медичної допомоги.

Будь-яка МІС, незалежно від сфери її застосування, програмного та апаратного забезпечення, має за мету надання повної, достовірної та своєчасної інформації. Доцільно виділити такі дві основні групи МІС: системи цільового аналітично-діагностичного призначення та системи забезпечення зберігання та обміну медичними даними з функціями керування взаємодією користувачів з різним рівнем доступу до цієї інформації.

На сьогодні процес створення МІС-підтримки діагностування та лікування охопив всі галузі медицини, створено та вдосконалюються діагностичні комплекси для точнішого аналізу та діагностування, розширюється коло завдань та покращується зручність використання систем. Розроблення таких комплексів охоплює широкий спектр завдань, насамперед, спрямованих на визначення складників моделі МІС: «Об'єкт» (знання про об'єкт — про пацієнта) та «Бізнес-моделі діагностичного та лікувального процесів» (з використанням математичних методів аналізу стану об'єкта) [8].

За результатами аналізу інформаційно-функційних процесів в системі охорони здоров'я ми надали узагальнену модель МІС як елементу екосистеми цифрової медицини, яка об'єднує такі складники:

- 1) функції МІС відповідно до її призначення;
- 2) різні види подання інформації про надання медичної допомоги, до яких належать електронні медичні записи та документи, цифрові медичні зображення, цифрові медичні сигнали, графічні матеріали тощо;
- 3) інформаційні потоки між МІС нижнього рівня та учасниками екосистеми ЦМ.

Такий погляд на МІС дав можливість оптимізувати інформаційні потоки та інтероперабельність в самій екосистемі.

Таблиця 1. Основні характеристики різних видів ЕМД

Ознаки	Вид електронного документа		
	EMR	EHR	PHR
Кінцевий користувач	Медичні фахівці одного відділення	Лікарі, працівники лабораторій та аптек, пацієнти	Пацієнти
Тип інформації	Медичний анамнез, рецепти, поточний стан здоров'я	Електронні записи інформації про здоров'я людини.	Інформація, яку вводять самі пацієнти, а також дані з інших джерел, (аптек, лабораторій та медичних закладів
Доступ до інформації	Записи можуть створювати, коригувати уповноважені лікарі і персонал одного закладу	Записи можуть створювати, коригувати уповноважені лікарі і персонал декількох закладів	Записи можуть створювати, коригувати пацієнти.

Інформаційні потоки та види персональних медичних записів. Медичні інформаційні системи є окремими вузлами інфраструктури цифрової медицини, наявна функційність визначає їхнє призначення та застосування. Створюється ієрархія вузлів-елементів, в якій можуть послідовно активуватися ті чи інші МІС для виконання необхідних завдань, спрямованих на задоволення потреб учасників цифрової екосистеми. Наприклад, МІС медичного закладу охорони здоров'я спрямовано на обмін інформацією між відділеннями цього закладу та підготовку звітної інформації, яка надається зовнішнім учасникам. МІС, яка забезпечує збереження та обмін електронними записами і цифровими медичними зображеннями, буде обов'язково пов'язана з джерелами цих даних та робочими місцями лікарів і цифровими сховищами тощо. МІС, які підтримують виконання специфічних функцій в охороні здоров'я, таких як контроль якості надання медичної допомоги, фінансові розрахунки, прогнозування діяльності закладів тощо, працюють як окремі модулі та застосовуються за потреби.

Отже, електронна охорона здоров'я складається з певної множини МІС, пов'язаних між собою, що створює мережу між закладами, пацієнтами та медичними працівниками. Сюди належать також і телемедичні системи, які можуть бути окремими мережами, але обов'язково пов'язаними з керувальними МІС ЕСОЗ.

Більшість даних, які циркулюють між учасниками інфраструктури цифрової медицини, є електронними медичними документами (ЕМД), тобто сукупністю електронних медичних записів, які формують один чи різні автори (лікарі, медичні сестри тощо). Для подальшого розмежування репрезентативних атрибутів ЕМД визначимо три подібні, але різні технології, пов'язані з картою пацієнтів: електронні медичні записи (EMR), електронні медичні документи (EHR) та електронний паспорт здоров'я пацієнта (PHR). Кожну з них диференційовано на основі рівня орієнтування на пацієнта (табл. 1). EMR часто розглядають як цифрові версії паперових карт у кабінеті клініциста [9]. Ці медичні записи пацієнтів у цьому разі орієнтовано на

постачальника послуг і майже недоступні для інших медичних працівників або для самих пацієнтів. На відміну від них, системи EHR пропонують ширше уявлення про пацієнта, сприяючи інтеграції з МІС за межами організації, яка збирала первинну інформацію про пацієнта [9]. Ці системи можуть узагальнювати дані про пацієнтів, отримані з багатьох медичних закладів, щоб створити єдиний облік пацієнтів з можливістю доступу різних медичних працівників [10, 11]. Нарешті, PHR функціонують під наглядом пацієнтів чи їхніх представників, і ці системи мають повну або часткову інформацію про стан здоров'я пацієнтів протягом усього життя [12].

Велика частка сучасної медичної інформації має вигляд цифрових медичних зображень, які можуть бути частиною ЕМЗ чи самостійно входити до відповідних БД і бути пов'язаними з ЕМЗ за допомогою персонального ідентифікатора (ID). Також інформація (та дані) може бути надана як різні графічні зображення чи відео.

Структура інформаційно-програмного забезпечення МІС кожного закладу охорони здоров'я складається з кількох баз даних відповідно до структури і виду збереженої медичної інформації та даних. Всі БД об'єднують у загальну мережу, доступ до якої реалізують для всіх учасників інфраструктури цифрової медицини за допомогою ID.

Персоналізація медичної допомоги. Сучасна медицина знаходиться на перехідному етапі, доповнюючи традиційну модель медицини, коли лікар лікує пацієнта у спеціальних медичних закладах, моделлю медицини майбутнього за п'ятьма базовими принципами — так званою "5Ps medicine", першим принципом якої є персоналізація для кожного пацієнта процесу надання медичної допомоги на всіх рівнях системи охорони здоров'я у діагностиці, терапії та моніторингу стану пацієнта.

Зазначимо один з аспектів сприяння технологій та засобів цифрової медицини для персоналізації медичної допомоги. Накопичення індивідуальних даних розширює спектр даних про здоров'я населення. Зручність збирання цифрових даних дає змогу формувати репрезентативні вибірки зі збалансованими розмірами груп. Цифрові пристрої є чутливими та об'єктивними і дають можливість збирати дані практично безперервно, що допомагає розрізняти захворювання за їхнім специфічним перебігом, сприяє саме персоналізації, точнішій класифікації захворювання та своєчасному лікуванню. Наразі більшість фенотипних даних про стан здоров'я генерується у клініці щодо пацієнтів з активною стадією захворювання, коли наявними є чіткі симптоми, і цим пацієнтам проводять або проводили діагностичні процедури. Бракує даних для порівняння зі станом здорового населення та з тими, захворювання яких має дуже ранні стадії розвитку. Аналіз цифрових даних за репрезентативними вибірками і збалансованими розмірами груп забезпечує створення надійніших прогнозних моделей.

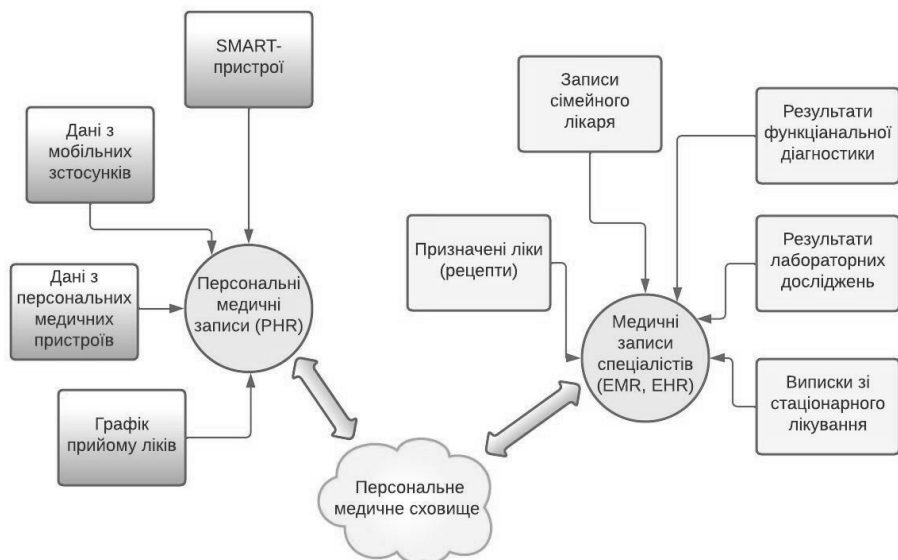


Рис.1. Узагальнена структура персонального медичного сховища

Підкреслимо, що за сучасними викликами всі учасники інфраструктури цифрової медицини (пацієнти, лікарі, співробітники лабораторій та відділень функційної діагностики тощо) потребують персональних медичних сховищ, які в узагальненому виді мають структуру, зображену на рисунку 1.

МОБІЛЬНА МЕДИЦИНА ТА ВЗАЄМОДІЯ МОБІЛЬНИХ ЗАСТОСУНКІВ З ЛОКАЛЬНИМ ІНФОРМАЦІЙНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ ЗАКЛАДУ ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я

Потреба у доступнішій медичній допомозі зумовила розвиток **телемедичних технологій** (ТМ) у перше десятиріччя XXI сторіччя, що стимулювало запровадження великої кількості локальних телемедичних систем для надання консультацій за окремими медичними питаннями. Створення ефективної міжрегіональної телемережі України базувалося на запропонованій нами теорії телемедичних систем (ТМ) з визначенням принципів організації цих систем, критеріїв і методів аналізу цифрових медичних даних та безпечних способів передавання необхідної медичної інформації [13, 14]. Використання запропонованих принципів: забезпечило узгодження структури ТМ мережі з організацією системи охорони здоров'я, в інформаційному середовищі якої функціонує ця мережа (принцип ієрархічної побудови мережі ТМ); надало можливість розвивати мережу з використанням нових технологічних платформ для розширення цільового простору та підвищення ефективності медичної допомоги шляхом модернізації інформаційно-комунікаційної бази ТМ (принцип адаптивності); забезпечило «вертикальну» подібність з різними рівнями структури ТМ мережі та визначило гнучкий процес підготовки та обміну медичними даними шляхом реалізації функції подібності (принцип фрактальності); зумовило «горизонтальну» організацію мережі ТМ, що забезпечує можливість тиражування програмних

продуктів на регіональному рівні та на рівні окремих медичних закладів (принцип масштабування). Така організація міжрегіональної телемедичної мережі ефективно забезпечує взаємодію телемедичних центрів та висококваліфікованих фахівців-консультантів (суб'єкти консультування) з об'єктами консультування — медичними установами та лікарями, які потребують кваліфіковану підтримку у прийнятті рішень.

Сьогодні для підвищення ефективності сучасних телемедичних систем використовують комунікаційні хмарні технології, можливість зберігання значних обсягів даних та надання доступу до їхнього використання за допомоги ґрид технологій, а також розвинені протоколи телемедичної взаємодії.

За останні десятиріччя мобільну медицину поповнено великою кількістю мобільних гаджетів, які є засобами самостійного вимірювання окремих показників стану здоров'я людини. Треба зазначити, що такі засоби мають вкрай обмежені функції без надійної вірогідності здійснюваних вимірювань і, особливо підкреслимо, здебільшого без застосування методів інтелектуального аналізу одержаної інформації, без належного її зберігання і без ефективної взаємодії з медичними системами підтримки діагностичних та лікувальних рішень лікарями, які надають медичні послуги пацієнтам — користувачам таких мобільних пристроїв. Саме тому проаналізуємо вимоги до забезпечення надійної та безпечної взаємодії мобільних застосунків та пристроїв з МІС та персональними медичними сховищами, які формують локальне інформаційне середовище закладу охорони здоров'я (ЗОЗ) України.

Взаємодія мобільних застосунків з локальним інформаційним середовищем закладу охорони здоров'я здійснюється двома шляхами. Перший з них задіяно у разі використання даних, що зберігаються в БД ЗОЗ. Доступ до нього мають тільки користувачі, яких зареєстровано в цій системі, а саме лікарі, керівники закладу тощо. Вони використовують свої інформаційні ресурси за допомогою мобільних застосунків на підставі прав доступу чи/та наявності електронного підпису. Як вже зазначено, кожен з користувачів має своє персональне сховище, яке має бути пов'язаним зі сховищем закладу охорони здоров'я.

Другий алгоритм реалізує опосередкований зв'язок (також за допомогою мобільних застосунків) з зовнішніми абонентами, які мають право на доступ до даних ЗОЗ. Це можуть бути консультанти та інші учасники інфраструктури цифрової медицини. До них належать також інші ЗОЗ, працівники Національної служби охорони здоров'я, користувачі чи працівники E-health України тощо.

У базовій структурі мобільного застосунку ядро (платформа на базі Android, IOS або Windows Mobile) слугує об'єднальником функційних блоків, кількість і специфіка яких відповідає завданням конкретного мобільного застосунка для певної групи користувачів. Як зазначено у Проєкті глобальної стратегії цифрової охорони здоров'я [1], на сьогодні коло користувачів значно розширено та охоплює постачальників медичних послуг різного рівня, менеджерів систем охорони здоров'я, служб медичних даних, зокрема державних чи приватних лікарень, різних лабораторій чи клініко-діагностичних центрів, сімейних лікарів, фельдшерів та фармацевтів. За такого широкого спектру користувачів — учасників інтегративного середовища цифрової медицини, підвищено вимоги до визначення рівнів доступу до медичної інформації та можливості змінювати цю

інформацію. Користувачів можна розділити на дві умовні категорії: медичний працівник певного рівня та пацієнти, кожна з яких може мати набір підкатегорій. Залежно від моделі взаємодії суб'єктів охорони здоров'я кількість підкатегорій може змінюватися. Припустимо, ми розглядаємо «домашній стаціонар» або систему паліативної допомоги, і в цьому випадку серед медичного персоналу буде лікар (терапевт), фельдшер або медсестра. Пацієнт може користуватися мобільним засобом особисто або за це відповідають родичі. Якщо взяти масштаб вторинного рівня медичної допомоги, то варто додати лікарів-діагностів, лікарів-консультантів та у разі госпіталізації — лікарів стаціонару.

Аналізуючи діяльність ЗОЗ у повному обсязі, зазначимо, що програмні блоки цілісної МІС охоплюють своєю інформаційною підтримкою практично всі сфери роботи такого закладу, зокрема взаємодію з різними мобільними застосунками (рис. 2). Розглянемо наші результати дослідження та розроблення мобільних застосунків для діагностування стану пацієнта, акумулювання та збереження одержаних даних для подальшого аналізу.

За розробленими моделями бізнес-процесів акумулювання та обміну цифровими медичними даними (ЦМД), характеристиками показників діагностування досліджуваних систем організму людини та сформованими специфікаціями БД створено програмний комплекс мобільних застосунків для обміну цифровими медичними даними між різними користувачами в процесі аналізу даних. Першим завданням було розробити програмний модуль «ExchangeDMD», який об'єднує алгоритми акумулювання і обміну цифровими медичними даними, вже одержаними у результаті діагностування, корегування та профілактики захворювань [15].

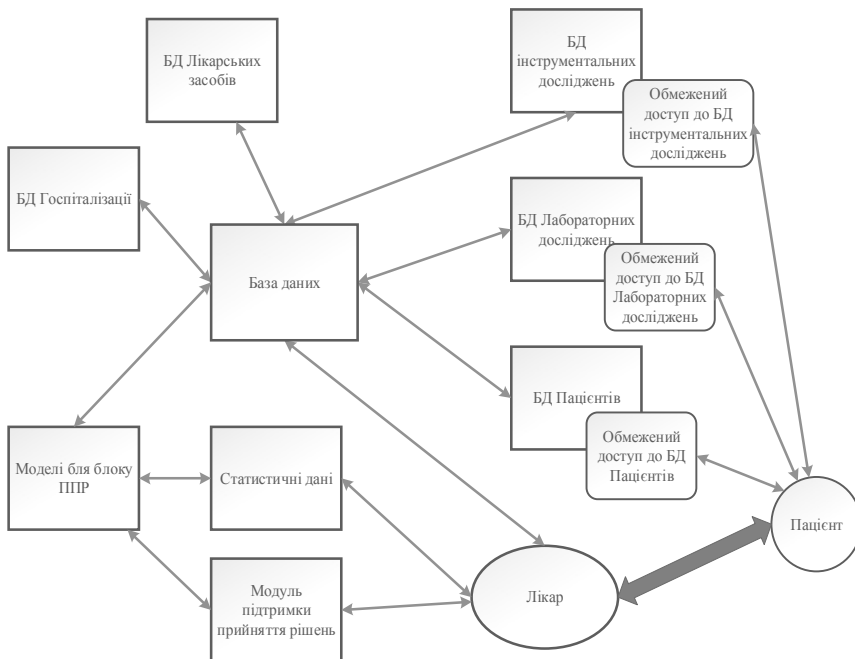


Рис 2. Структура взаємозв'язку програмних блоків цілісної МІС та мобільних застосунків з урахуванням завдань різних користувачів з відповідних баз даних

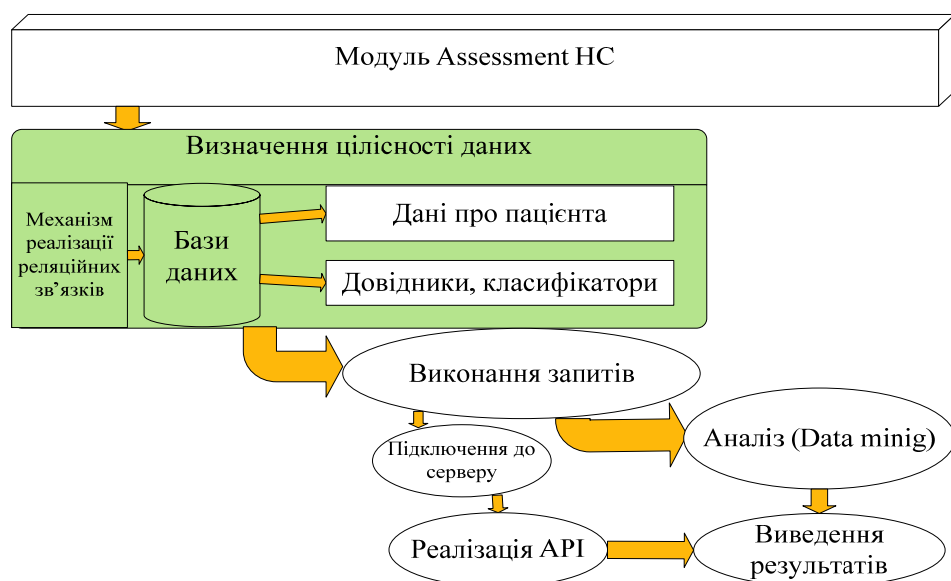


Рис 3. Структура мобільного модулю «AssessmentHC»

Для розширення функційних можливостей мобільних засобів застосовано розроблену інформаційну технологію класифікування та прогнозування стану пацієнта [16] у мобільному модулі «AssessmentHC», структура якого складається з трьох функційних блоків (рис. 3).

Перший блок модуля реалізує аналіз стану пацієнтів, для чого надано можливість послідовного чи вибіркового використання методів Data Mining: відсіювання неінформативних ознак і фільтрації змінних, кластерного аналізу (узагальненого ЕМ, методу k -середніх), загальних дерев класифікації і регресії (GTrees), загальних моделей CHAID (Chi-square Automatic Interaction Detection), зростання дерев (Boosted Trees), випадкового лісу (Random Forest), методу опорних векторів (SVM), методу k -найближчих сусідів (KNN), методів нейронних мереж (різних архітектур з інструментами для автоматичного вирішення проблеми). Другий блок має функцію акумулювання та накопичування даних, тобто є БД, створена на MySQL, яка розташована на віддаленому сервері чи на хмарі. БД складається з електронних медичних записів та пов'язана з першим блоком. Структура такої БД залежить від набору показників, які застосовуються з метою відповідного аналізу. Третій блок забезпечує передавання наявних даних за запитом користувачів.

Отже, використання розроблених мобільних застосунків «ExchangeDMD» і «AssessmentHC» забезпечує контроль за станом здоров'я пацієнта, дає змогу реалізувати обмін медичними даними різного походження між ними та здійснювати перегляд накопичених даних, оброблення, аналізування та прогнозування стану здоров'я людини.

ПЕРСПЕКТИВИ ЦИФРОВОЇ МЕДИЦИНИ

Останніми роками багато аналітиків та творчих колективів присвятили свої дослідження визначенню пріоритетів розвитку медицини майбутнього. Переліки таких пріоритетів мають різну деталізацію, несуть своєрідність авторських формулювань, виділені за різними критеріями: визначення пріоритетів суто за нозологіями, як це було надано у доповіді Інституту медицини Національних академій наук, техніки та медицини [17], виділення та аналізу одного, головного, за думкою авторів, напряму, зокрема нанотехнологій у медицині [18] тощо. Підкреслимо визначення серед пріоритетів цифрової охорони здоров'я тощо, зазначаючи, що ключ до усвідомлення її переваг знаходиться у застосуванні інформатики, вдосконалених інструментів прийняття клінічних рішень та досліджень штучного інтелекту [19, 20].

Акцентуючи увагу на цифровій медицині, зазначимо, що її розвиток буде спрямовано на вирішення таких проблем:

- персоналізація надання медичної допомоги на основі застосування інтелектуальних технологій, які допоможуть підвищити якість лікувально-діагностичних процедур та ефективність застосування медичних стандартів на рівні системи охорони здоров'я;

- перехід до збільшення частки оздоровчої медицини у наданні медичної допомоги, що ґрунтуватиметься на цифрових методах прогнозування результатів реабілітації та оздоровчих технологій та виявленні ранніх стадій розвитку захворювань, виходячи з методів аналізу даних здоров'я населення певного регіону;

- глобалізація цифрової медицини, яка забезпечить можливість цифровізації медичної допомоги на міждержавному рівні.

Цифрова медицина має потенціал для трансформації охорони здоров'я в усьому світі. Багато цифрових продуктів для покращення системи охорони здоров'я вже перевірено, вони є легкодоступними та адаптованими до будь-яких країн. Цифрові технології демонструють свій потенціал під час теперішньої коронавірусної кризи, полегшуючи міжнародну співпрацю між дослідниками в галузі охорони здоров'я та зменшуючи потребу в медичних працівниках для підтримки надання медичної допомоги населенню. Отже, застосування цифрових технологій підвищить ефективність та якість медичних послуг. Цифрова медицина уможливить об'єднання ресурсів, досвіду і стратегій розвитку медицини, а також дасть можливість медичній спільноті реалізувати справжній потенціал цифрового здоров'я.

Глобальна цифрова система охорони здоров'я знаходиться лише на стадії зародження і, як будь-який новий процес, проходить етапи поступового ускладнення завдань, методів і засобів їхньої реалізації: від інноваційних методів формалізації електронних даних до вдосконалення методів їхнього аналізу, передачі та зберігання з метою вдосконалення якості медичної допомоги пацієнтам у будь-який час і в будь-якій точці світу.

Підсумовуючи аналіз переваг цифрових технологій в галузі охорони здоров'я та сучасних МІС, зазначимо, що догляд за пацієнтами стає безпечнішим, ефективнішим та надійнішим. Лікарі, медичні сестри та інший медичний персонал використовують мобільні пристрої для запису та обміну необхідними даними пацієнтів у режимі реального часу, оперативно одержують лабораторні результа-

ти, рентгенівські знімки та іншу важливу інформацію про пацієнтів, що може мати вирішальне значення для забезпечення ефективного догляду за пацієнтом. Спеціальні програмні модулі та мобільні застосунки, створені на основі міжнародних медичних інформаційних стандартів, уможлиблюють поглиблене визначення перебігу захворювань та їхніх симптомів, використання доступних баз даних, що надає можливість медичним працівникам ефективно відстежувати основні прояви хвороби, виявляти їх та надавати пацієнтам кращу допомогу.

ВИСНОВКИ

Розроблена модель цифрової трансформації в медицині включає такі компоненти, як цифрові методи отримання та аналізу біомедичних сигналів і цифрових медичних зображень, методи формування електронних медичних записів і документів, методи та засоби побудови екосистеми цифрової медицини і здійснення обміну даними та інформацією на основі принципів інтероперабельності. Це все дає підстави для створення великих інформаційних мереж із застосуванням медичних інформаційних систем як складників глобальних інтелектуальних ресурсів для потреб сучасної охорони здоров'я, з використанням хмарних технологій для зберігання інформації, інтелектуальних інформаційних технологій для забезпечення належного аналізу цього величезного обсягу інформації та підтримки прийняття рішень лікарями на всіх етапах надання медичної допомоги.

Запропонований програмний комплекс мобільних застосунків для аналізу та обміну цифровими медичними даними між різними користувачами під час надання медичної допомоги, який складається з мобільних застосунків аналізу та прогнозування стану пацієнта, акумулювання та обміну цифровими медичними даними, забезпечує контроль за станом здоров'я пацієнта. Використання розроблених мобільних застосунків дає змогу здійснювати перегляд накопичених даних, аналіз та прогнозування стану здоров'я людини за розробленими моделями Data Mining та реалізувати обмін медичними даними різного походження між пацієнтом та лікарем.

ЛІТЕРАТУРА

1. Draft global strategy on digital health 2020–2025. July 2020 by WHO <https://www.who.int/docs/default-source/documents/g4dhdaa2a9f352b0445bafbc79ca799dce4d.pdf> (Last accessed: 29.12.2021)
2. The European Programme of Work, 2020–2025: United Action for Better Health. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 2021 <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/339209/WHO-EURO-2021-1919-41670-56993-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
3. Медицинская информационная система. К.: Наук. думка, 1975. 508 с.
4. EN ISO 12052: 2011. Health informatics. Digital work, including workflow and data management URL: <http://iso.org>. (Last accessed: 20.10.2017)
5. Oosterwijk H. DICOM Basics (Third Edition). O Tech. 2005.
6. 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. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2018. 4(194). С. 61–78.
7. The Digital Imperative. The imperative for a consumer-centric, digitally enabled health ecosystem. Deloitte. 10 p.: <https://www.kff.org/health-costs/poll-finding/data-note-americans-challenges-with-health-care-costs/>

8. Haider J. Warraich, Robert M. Califf, Harlan M. Krumholz The digital transformation of medicine can revitalize the patient-clinician relationship. Інформаційний ресурс: www.nature.com/npjdigitalmed
9. What are the differences between electronic medical records, electronic health records, and personal health records? Інформаційний ресурс: <https://www.healthit.gov/faq/what-are-differences-between-electronic-medical-records-electronic-health-records-and-personal>;
10. Hoerbst A., Ammenwerth E. Electronic Health Records. A Systematic Review on Quality Requirements. *Methods Inf Med*, 2010; 49(04): 320–336.
11. Nguyen L., Bellucci E., Thuy Nguyen L. Electronic health records implementation: An evaluation of information system impact and contingency factors. *International Journal of Medical Informatics*. Vol. 83, Iss. 11, November 2014, pp.779–796
12. Chén O.Y., Roberts B. R. Personalized Health Care and Public Health in the Digital Age. *Front. Digit. Health*, 30 March 2021. V. 3. Article 595704. <https://doi.org/10.3389/fdgth.2021.595704>. (Last accessed: 22.05.2021)
13. Коваленко А.С., Козак Л.М., Осташко В.Г. Телемедицина — развитие единого медицинского информационного пространства. *Управляющие системы и машины*. 2005. №3. С. 86–92.
14. Коваленко А.С., Козак Л.М., Романюк О.А. Информационные технологии цифровой медицины. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2017. №1(187). С.67–79.
15. Romaniuk, O. O., Kozak, L. M., and Kovalenko, O. S. Formation of Interoperable Digital Medicine Information Environment: Personal Medical Data. *Sci. innov*. 2021. V. 17, no. 5. P. 50–62.
16. Kryvova O.A., Kozak L.M. Information Technology for Classification of Donosological and Pathological States Using the Ensemble of Data Mining Methods. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2021, 1(203), pp 77–96.
17. Officials Should Target 20 Key Areas to Transform Health Care System <https://www8.nationalacademies.org/onpinews/newsitem.aspx?RecordID=10593>
18. Нанотехнологии — ключевой приоритет обозримого будущего в медицине <http://nanolab.com.ua/publicacii/article4.html> (Last accessed: 14.01.2022)
19. Australian Medical Research and Innovation Priorities 2018–2020 Determination 2018. <https://www.legislation.gov.au/Details/F2018L01550>
20. Reddy, M. Digital Transformation in Healthcare in 2021: 7 Key Trends. <https://www.digitalauthority.me/resources/stateofdigitaltransformationhealthcare/> (Last accessed: 14.01.2021).

Отримано 11.02.2022

REFERENCES

1. Draft global strategy on digital health 2020–2025. July 2020 by WHO <https://www.who.int/docs/default-source/documents/gd4dhdaa2a9f352b0445bafbc79ca799dce4d.pdf> (Last accessed: 29.12.2021)
2. The European Programme of Work, 2020–2025: United Action for Better Health. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 2021 <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/339209/WHO-EURO-2021-1919-41670-56993-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Last accessed: 29.05.2021)
3. Medical information system. Kyiv: Nauk. Dumka, 1975. 508 p. (in Russian).
4. EN ISO 12052: 2011. Health informatics. Digital work, including workflow and data management URL: <http://iso.org>. (Last accessed: 15.10.2021)
5. Oosterwijk H. *DICOM Basics* (Third Edition). O Tech. 2005.
6. 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. *Kibernetika i vyčislitel'naâ tehnika*. 2018. 4(194). С. 61–78.
7. The Digital Imperative. The imperative for a consumer-centric, digitally enabled health ecosystem. Deloitte. 10 p.: <https://www.kff.org/health-costs/poll-finding/data-note-americans-challenges-with-health-care-costs/>
8. Haider J. Warraich, Robert M. Califf, Harlan M. Krumholz The digital transformation of medicine can revitalize the patient-clinician relationship. www.nature.com/npjdigitalmed

9. What are the differences between electronic medical records, electronic health records, and personal health records? <https://www.healthit.gov/faq/what-are-differences-between-electronic-medical-records-electronic-health-records-and-personal>;
10. Hoerbst A., Ammenwerth E. Electronic Health Records. A Systematic Review on Quality Requirements. *Methods Inf Med*, 2010; 49(04): 320–336.
11. Nguyen L., Bellucci E., Thuy Nguyen L. Electronic health records implementation: An evaluation of information system impact and contingency factors. *International Journal of Medical Informatics*. Vol. 83, Iss. 11, November 2014, pp.779–796
12. Chén O.Y., Roberts B. R. Personalized Health Care and Public Health in the Digital Age. *Front. Digit. Health*, 30 March 2021. V. 3. Article 595704. <https://doi.org/10.3389/fdgth.2021.595704>.
13. Kovalenko A.S., Kozak L.M., Ostashko V.G. Telemedicine - development of a unified medical information space. *Upravläüšie sistemy i mašiny*. 2005. №3. C. 86–92. (In Russian)
14. Kovalenko A.S., Kozak L.M., Romanyuk O.A. Information technology of digital medicine. *Kibernetika i vyčislitel`naâ tehnika*. 2017. №1(187). C.67–79. (In Russian)
15. Romaniuk, O. O., Kozak, L. M., and Kovalenko, O. S. Formation of Interoperable Digital Medicine Information Environment: Personal Medical Data. *Sci. innov*. 2021. V. 17, no. 5. P. 50–62.
16. Kryvova O.A., Kozak L.M. Information Technology for Classification of Donosological and Pathological States Using the Ensemble of Data Mining Methods. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2021, 1(203), pp 77–96.
17. Officials Should Target 20 Key Areas to Transform Health Care System <https://www8.nationalacademies.org/onpinews/newsitem.aspx?RecordID=10593>
18. Nanotechnology is a key priority for the foreseeable future in medicine <http://nanolab.com.ua/publicacii/article4.html>
19. Australian Medical Research and Innovation Priorities 2018–2020 Determination 2018. <https://www.legislation.gov.au/Details/F2018L01550>
20. Reddy, M. Digital Transformation in Healthcare in 2021: 7 Key Trends. <https://www.digitalauthority.me/resources/stateofdigitaltransformationhealthcare/> (Last accessed: 14.01.2021).

Received 11.02.2022

Kovalenko O.S., DSc (Medicine), Professor,
Head of the Medical Information Systems Department
ORCID 0000-0001-6635-0124, e-mail: askov49@gmail.com
Kozak L.M., DSc (Biology),
Leading Researcher of the Medical Information Systems Department
ORCID: 0000-0002-7412-3041, e-mail: lmkozak52@gmail.com
Najafian Tumajani M.,
Junior Researcher of the Medical Information Systems Department,
e-mail: najafian@mail.ru,
Romanyuk O.O.,
Junior Researcher of the Medical Information Systems Department
ORCID:0000-0002-6865-1403, e-mail: 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,
40, Glushkov ave., Kyiv, 03187, Ukraine

EXPERIENCE AND PROSPECTS OF CREATING THE MEDICAL INFORMATION SYSTEMS AND INFORMATION TECHNOLOGIES TO SUPPORT MEDICAL CARE

Introduction. One of the four flagship initiatives identified by the WHO as health priorities for the coming years is Initiative to enable citizens for receive quality health care through digital health care. The use of digital medical technologies to provide health care will serve

for strengthening the Flagship the health care system, empowering patients and achieving the principle of "health for all".

The purpose of the paper is to summarize the experience and latest results on Digital Medicine of the scientists of the Medical Information Systems Department of the International Research and Training Center for Information Technologies and Systems against the background of the general process of digital transformation in medicine.

Results. The main characteristics and principles of building modern medical information systems (MIS) as components of the digital medicine ecosystem are determined. Internal and external information flows of MIS were analyzed. To further differentiation the representative attributes of formed electronic health documents, three similar but different technologies associated with the patient card were identified: electronic medical records, electronic health records and electronic patient health passport, each of which take into account the different level of patient orientation. Based on one of the "5Ps medicine" principles, the principle of personalization, the structure of personal medical storage is determined, which according to modern challenges is needed by all participants in digital medicine infrastructure (patients, doctors, laboratories and functional diagnostics departments, etc.). To ensure the interconnection of such repositories, models of business processes of accumulation and exchange of digital medical data have been created and based on them mobile applications, modules for accumulation and exchange of digital medical data between different users in diagnostic data analysis have been developed. The interaction of mobile applications with the local information environment of the health care institution are analyzed and its features are taken into account in the created specialized mobile software modules of accumulation and analysis of personal medical data.

Conclusion. The developed model of digital transformation in medicine, which includes digital methods of obtaining and analyzing biomedical signals, digital medical images, methods of forming electronic medical records and documents, allowed to create methods and tools for building the digital medicine ecosystem. The use global intellectual resources were provided the necessary level for analysis Big Data and decision support for doctors at all stages of medical care. Applying the developed mobile tools of accumulation, analysis and exchange of personal medical data allows to review the accumulated data, assess and predict human health according to the developed Data Mining models and implement medical data exchange of different origins between patient and doctor.

Keywords: medical information systems, digital medicine ecosystems, medical information technologies, mobile applications, classification models Data Mining.

DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt207.01.074>

УДК: 616.379-008.64:004.62:614.2 CC BY-NC

КІФОРЕНКО С.І., д-р біол. наук, старш. наук. спіроб.,
пров. наук. спіроб. відд. застосування математичних
і технічних методів у біології та медицині
ORCID: 0000-0001-2345-6789, e-mail: skifor@ukr.net

БЄЛОВ В.М., д-р мед. наук., проф.,
зав. відд. застосування математичних
і технічних методів у біології та медицині
ORCID: 0000-0001-8012-9717, e-mail: motj@ukr.net

ГОНТАР Т.М., канд. біол. наук, старш. наук. спіроб.,
стар.наук.співр. відд. застосування математичних
і технічних методів у біології та медицині
ORCID: 0000-0002-9239-0709, e-mail: gtm_kiev@ukr.net

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

ПРИНЦИП ІЄРАРХІЧНОСТІ ЯК ОСНОВА ДОСЛІДЖЕННЯ БІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

Світлій пам'яті професора Юрія Антомонова —
нашого Вчителя, Друга, Наставника, присвячується

Як виміряти вимірюване і перетворити невимірю-
ване на те, що можна виміряти

Г. Галілей

Вступ. Біологічні системи є системами надзвичайно складними, процеси функціонування в них не є сталими, вони постійно змінюються залежно від внутрішнього стану і від стану зовнішнього середовища. З багатьох загальних принципів, що складають методологічну основу наукового напрямку вивчення функціонування біологічних систем, принцип ієрархічності є основним відповідальним за структурну організацію досліджень.

Мета статті — показати доцільність використання принципу ієрархічності на прикладах розроблення інформаційно-структурної моделі категорії здоров'я як інтегративного структурного поняття та синтезу технології ієрархічного моделювання як основи сучасних доклінічних випробувань.

Результати. Розроблено ієрархічну структуру технології оцінювання категорії здоров'я, яка включає декілька рівнів: концептуальний, керувальний (синтез оцінюва-

льних моделей і алгоритмів обчислення резервів здоров'я за нормоіндексом), рівень синтезу технологічних процедур шкалювання і діагностичних висновків. Створено технологію математичного моделювання за використання ієрархії моделей різної складності для імітаційного дослідження різних алгоритмів керування рівнем глікемії (аналітичних, чисельних, імітаційних) для прогнозування глікемічного профілю на етапі доклінічних випробувань.

Висновки. Ієрархічна організація структури дослідження категорії здоров'я дала змогу отримувати кількісно-вербальні висновки про стан резервів здоров'я в цілому і всіх його складників з урахуванням нормоіндексу, що збільшило роздільну здатність оцінювальних алгоритмів. Запропонована технологія ієрархічного моделювання регуляції глікемії у хворих на діабет дає можливість ще на доклінічному етапі оцінити особливості використання алгоритмів регуляції, щоб запобігти помилок безпосередньо в практиці лікування.

Ключові слова: принцип ієрархичності, інформаційно-структурна модель категорії здоров'я, ієрархічне моделювання, система регуляції глікемії, імітаційні доклінічні випробування.

ВСТУП

Біологічні системи є системами надзвичайно складними, процеси функціонування в них не є сталими, вони постійно змінюються залежно від внутрішнього стану і від стану зовнішнього середовища. Вивчення таких систем є також не простим процесом і, відповідно, вимагає адекватних підходів. Ефективним напрямом в різних сферах діяльності зарекомендував себе системний аналіз, який широко використовується у розв'язанні складних багатофункційних проблем. З багатьох загальних принципів, що складають методологічну основу цього наукового напрямку, принцип ієрархичності є основним відповідальним за структурну організацію досліджень.

В Міжнародному науково-навчальному центрі інформаційних технологій та систем наукова школа професора Ю.Г. Антомонова понад 25 років розвиває напрям вивчення біологічних систем із застосуванням широкого спектра математичних методів на основі принципу ієрархичності.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Біологічна система — це складно організована система, яка сформувалася у процесі еволюції та є сукупністю добре скоординованих підсистем з певною конфігурацією впорядкованих взаємовідношень. Такий організований і збалансований порядок визначає здатність живих систем адекватно реагувати і протистояти змінним умовам зовнішнього середовища, забезпечуючи їхнє виживання часто у випадкових і непередбачуваних ситуаціях.

Саме системний аналіз став тим адекватним науковим напрямом, який сприяв вирішенню складних проблем, пов'язаних з багатофакторністю, неоднозначністю, невизначеністю об'єктів дослідження, притаманних біологічним системам.

Багато у чому розвиток цього напрямку стимульовано бажанням дізнатися та зрозуміти загальні принципи світоустрою. Всеосяжна та детальна інформація про становлення та розвиток цієї сфери знань і пов'язаної з нею діяльності міститься у багатьох монографіях, наукових статтях, на сайтах в Інтернеті, наприклад [1–3]. Засновником цього наукового напрямку був австрійський вчений Ludwig von Bertalanffy, видатний фахівець у галузі теоретичної біології. Він

сформулював основи формування системних концепцій у біології, які базуються на поняттях цілісності, організації та ієрархічності [4]. Водночас він зазначав, що принцип ієрархічності є основним принципом організування системи, та проілюстрував це на різних прикладах функціонування біологічних систем.

Поняття ієрархічності виникло у давнину і пов'язано з природною здатністю мислення вибирати найприйнятніший варіант з безлічі варіантів для забезпечення життєдіяльності, вибудовувати ці варіанти в ряд, тобто ранжувати їх у певній послідовності від кращого до гіршого або навпаки [5]. Формалізм технології ранжування, закладений природою і відображений у процесах мислення, блискуче математично реалізовано від концепції до алгоритму в роботі T.L. Saaty (1980) [6]. Цей алгоритм використовують у розробленні систем підтримки прийняття рішень щодо функціонування складних систем, щоб впорядковувати і вибирати найприйнятніший варіант рішення із запропонованих альтернатив.

Наразі поняття ієрархічності широко використовують в наукових дослідженнях у різних галузях діяльності, коли виникає потреба упорядкувати складники об'єкта за змістом, за рівнем складності або за будь-яким іншим критерієм відповідно до специфічних рис проблематики дослідження. Ієрархічний порядок є тим фундаментальним поняттям як загальної теорії систем, так і різних сфер життєдіяльності — теоретичної і практичної, яке формує мислення та творчу активність людини. Практика прикладного використання принципу ієрархічності залежить від специфіки досліджуваних проблем та пов'язаних технологічних особливостей. Для дослідження об'єктів, вкладених у кожний рівень ієрархії, використовують методи відповідно до ступеню абстракції, адекватні досягненню мети конкретного дослідження. Новий імпульс розвитку загальної теорії систем надав П.К. Анохін. У своїй роботі [7] він зазначає, що є разюча гармонія між цілим, «універсумом», та його складниками. Він розвинув уявлення про системний характер досліджуваних об'єктів, включивши поняття «результат» у структуру системного дослідження.

Починаючи з 60-х років XX століття, професор Ю.Г. Антомонов та співробітники керованого ним відділу Міжнародного центру використовували у своїй науковій діяльності принципи системного підходу, такі як ієрархічність, складність, структурно-функційна організація, для дослідження біологічних систем. Перші наукові результати творчого колективу пов'язано з розробленням теоретично-алгоритмічних методів дослідження принципів та закономірностей функціонування біологічних систем різного рівня ієрархії шляхом узагальнення алгоритмів дослідження первинного інформаційного масиву даних та розроблення нових методів і засобів з використанням інформаційних технологій та комп'ютерних засобів для отримання нового знання про функціонування цих систем і синтез комп'ютерних систем діагностики, прогнозування та керування. Водночас проф. Ю.Г. Антомонов зазначав, що біосистеми завершують собою певний етап еволюції матерії, реалізувавши складність цього процесу шляхом організації сформованих ієрархічних структур. Він запропонував ієрархічну організацію живої системи, в якій для кожного рівня ієрархії виділено свою структурно організовану підсистему, яка виконує певну функцію [8].

Проблематику наукових розроблень школи професора Антомонова Ю.Г. того періоду пов'язано з вивченням структурно-функційних закономірностей живих систем різних рівнів ієрархії, починаючи від клітинного рівня (нервова, м'язова клітини), рівня окремих органів (вестибулярний апарат), різних фізіологічних систем (системи дихання, вуглеводного обміну) до рівня цілісного організму [9–13].

Мета статті — показати доцільність використання принципу ієрархичності на прикладах розроблення інформаційно-структурної моделі категорії здоров'я як інтегративного структурного поняття та синтезу технології ієрархічного моделювання як основи сучасних доклінічних досліджень.

ЗАСТОСУВАННЯ ПРИНЦИПУ ІЄРАРХІЧНОСТІ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЗДОРОВ'Я ЯК ІНТЕГРАТИВНОГО СТРУКТУРНОГО ПОНЯТТЯ

Відомо, що здоров'я людини залежить від функційної врівноваженості організму з навколишнім середовищем з урахуванням стану фізичної, психічної та соціальної комфортності організму людини. У зв'язку з цим здоров'я розглянуто як складну ієрархічну структуру, як триєдність його фізичного, психічного та соціального складників зі своїми внутрішніми вкладеннями, що вперше запропоновано нами в 1993 у «Відкритій концепції здоров'я» [14]. Надалі проблематика вивчення здоров'я як категорії, яка є складно організованою системою біологічної, психологічної та соціальної природи і потребує принципів системного підходу для її вивчення, стала одним з основних напрямів роботи колективу, який має теоретичну та прикладну значимість [15–17].

Інформаційно-технологічну структуру оцінювання здоров'я можна надати як ієрархічно розгалужене дерево, яке містить, щонайменше, п'ять рівнів, кожний з яких має різну кількість інформаційних модулів, а саме: *перший рівень* структури здоров'я — це концептуальний рівень, тобто інтегральне індивідуальне здоров'я з його основними окремими статусами: фізичним, психічним та соціальним з відповідними вкладеннями, які мають власну структуру і функцію; *другий рівень* — це технологічні процедури, пов'язані з формуванням спеціальних масивів оброблення даних об'єктивних лабораторних спостережень і суб'єктивних даних опитувань; *третій рівень* є керувальним, зі складниками, які подано окремими модулями оцінювальних моделей і алгоритмами обчислення резервів здоров'я за новим поняттям — нормоіндексу; *четвертий і п'ятий рівні* є технологією оцінювання на основі багатовимірного шкалювання і забезпечують інтерпретацію результатів і діагностичний висновок (Рис. 1).

Використання принципів системного аналізу, які базуються на методах композиції-декомпозиції, для вивчення систем великої розмірності забезпечує впорядкування досліджуваної предметної сфери. Така ієрархічна організація дослідження знімає «Беллманівське прокляття розмірності», сприяє збереженню багатофакторності процесів, які відбуваються в складних живих організмах, шляхом врахування чіткої ієрархії структури відповідно до архітектоники досліджуваних об'єктів.

Водночас, у терміні «багатомірність» міститься потреба у визнанні об'ємності, багатогранності, багатофакторності живих об'єктів, у прагненні адекватнішого наближення до реальності. У цьому контексті багатови-

мірність крізь призму ієрархічності може бути одним з методологічних принципів пізнання, який сприяє виробленню актуальних підходів до вирішення багатьох складних проблем теоретичного і прикладного характеру, зокрема про категорії, які принципово не підлягають явно кількісному вимірюванню [18]. Як виміряти здоров'я? Як розширити можливості вимірювальних прийомів до меж, здатних відобразити багатогранність реального об'єкта? Як виміряти незмірне? Реалізація принципу ієрархічності дала нам змогу розробити метод кількісного оцінювання здоров'я в цілому та його складників, а також ефективно використовувати цей принцип не лише для діагностики, а й для підтримки прийняття лікарських рішень щодо корегування стану пацієнта.

Для оцінювання стану функціонування систем організму і здоров'я в цілому ми користуємось поняттям референтного діапазону зміни показників. У розробленій нами технології діагностування і кількісного оцінювання здоров'я запропоновано нове поняття «нормо-індексу» зі спеціальною шкалою оцінювання, що підвищує інформативність змін натурних фізіологічних та евристичних показників, які характеризують стан здоров'я людини. Розроблений алгоритм розрахунку діапазону нормо-індексу для натурних і евристичних показників фізичного і психо-соціального статусів здоров'я має більшу роздільну здатність стосовно референтної зони показників, враховуваних для оцінювання здоров'я [17].



Рис. 1. Інформаційно-ієрархічна структура технології оцінювання здоров'я

Отже, формування знань про «цілісне» здоров'я базується на системі локальних метрик, побудованих на ієрархічній структурі показників і всіх структурних елементів, за допомогою яких відбувається перетворення їх у контекстно значиму інтегральну оцінку. Залежно від вибраного контексту, технологія дає змогу висвітлити будь-яку бажану грань з цілісного багатовимірного уявлення і зробити кількісно-вербальний висновок про стан оцінюваних складників здоров'я та про стан об'єкта в цілому.

Запропонований оперативний контроль за станом здоров'я, що базується на технології ієрархічно організованої кількісної міри здоров'я, дає користувачу інформаційну основу оздоровчої стратегії, яка передбачає наявність обґрунтованих систем оздоровлення та алгоритмів їх використання для збереження та розширення резерву персонального здоров'я.

ІЄРАРХІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЯК ОСНОВА ТЕХНОЛОГІЇ СУЧАСНИХ ДОКЛІНІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Поряд з великою кількістю різних методів дослідження та пізнання реальності гідне місце посідає математичне моделювання як ефективний інструмент для компактного подання досліджуваного матеріалу в наукових та прикладних дослідженнях та як інструмент отримання результатів, які принципово неможливо отримати в реальних дослідженнях. Математичне моделювання є методологією кодування знань математичними символами. По суті, у символіці моделей містяться досвід та знання, накопичені за багато років вивчення систем та процесів різної природи та подані у вигляді компактних об'єктів, що дає змогу використовувати сучасний математичний апарат для розв'язання широкого спектра теоретичних та практичних ситуаційних завдань.

Як зазначено вище, напрям вивчення біологічних систем, розвинутий науковою школою професора Ю.Г. Антомонова, базовано на гармонійному поєднанні теоретичного і прикладного підходів з використанням математичного моделювання біологічних систем різного рівня ієрархії. Такий підхід дав змогу поглибити кількісне трактування механізмів фізіологічних процесів, які відбуваються на різних ієрархічних рівнях функціонування організму. Запропоновано принципи вибору математичного апарата для адекватного описання фактичного матеріалу, які базуються на складності організації та динамічності досліджуваних біосистем, і за якими синтезовано алгебраїчні та імовірнісні моделі біологічних систем, динамічні моделі, а також методи їхньої ідентифікації та алгоритми керування. Запропоновано класифікацію моделей за принципом глибини імітації досліджуваних процесів: функційні, апроксимаційні моделі, які не розкривають суті біологічного процесу, а тільки формально повторюють його основну функційну залежність; структурно-функційні, які відтворюють механізми і структуру взаємодії внутрішніх складників досліджуваної системи; моделі, які враховують фізико-хімічні властивості процесів, що їх вивчають.

Розроблено низку математичних моделей, які описують різні аспекти функціонування біологічних систем [10–13, 15, 16]. Проблематика наукових досліджень школи Антомонова Ю.Г. починаючи з 70-х років безпосередньо пов'язана з математичним моделюванням фізіологічних процесів і систем, зокрема системи регуляції глікемії, функціонування нервової клітини тощо [10, 11].

Під час описання біологічних систем математичними методами постає проблема, зумовлена надзвичайною складністю об'єкта дослідження, що потребує врахування великої кількості властивостей, факторів та зв'язків для наближення опису об'єкта до реальності. Розмірність моделі, її структурна складність залежить від мети її використання. Методологічні і прикладні аспекти використання різних за складністю моделей у наукових дослідженнях розглядаються у багатьох роботах, наприклад [12,13, 15, 19–22].

Нами запропоновано технологію *ієрархічного моделювання* з використанням математичних моделей різного рівня складності в єдиному технологічному комплексі для підтримки прийняття рішень у діабетології на різних етапах лікувального процесу: діагностики, корекції лікування, прогнозування [22].

Моделі MAXMOD, складні за структурою з урахуванням великої кількості регулювальних факторів, використовують в основному для теоретичних досліджень під час перевірки гіпотез про функціонування біологічних систем в цілому. За моделями такого типу можна кількісно оцінити внесок окремих елементів у загальний процес регуляції, що має певне теоретичне значення. Моделі середньої складності MIDIMOD є зручними для практичного застосування, для виконання конкретних обчислень і можуть бути інструментом за використання теорії керування для синтезу оптимальних алгоритмів [16]. Спрощені моделі MINIMOD, в яких обчислення виконуються за конкретними формулами, є зручними для використання в спеціалізованих технічних автономних пристроях. Такий поділ моделей є умовним, оскільки моделі, розроблені з дослідницькою метою, можуть бути застосовані для розв'язання багатьох важливих практично завдань і, навпаки, результати, отримані за спрощеними моделями, можуть мати теоретичне значення [20, 22]. Зважаючи на різну складність моделей, методи роботи з ними розподіляють на *імітаційні* — для імітаційних досліджень за моделями MAXMOD, *алгоритмічні* — для моделей MIDIMOD, і *аналітичні* — для розрахунків за моделями MINIMOD. Водночас перевагу надають аналітичним розв'язанням, навіть у спрощеній постановці, оскільки вони зручніші для використання в автономних пристроях [21].

Схематично технологію ієрархічного моделювання надано на рис. 2.

Перший рівень ієрархії — «віртуальний пацієнт» MAXMOD — подано складною системою диференціальних рівнянь, праві частини яких містять велику кількість параметрів і нелінійностей сигмоподібного типу, і в які закладено механізми гепатичного глюкозного балансу (глікогеноліз і глікогеносинтез), інсулінозалежної та інсулінонезалежної регуляції процесу утилізації глюкози, видалення надлишків глюкози завдяки нирковій елімінації, функції підшлункової залози (секреція інсуліну), контрінсулярної функції секреції глюкагону.

Другий рівень ієрархії — MIDIMOD — значно простіша, двокompартментальна модель з обмеженими функційними можливостями, яка імітує інсуліно-глюкозні взаємозв'язки в організмі, дає змогу аналізувати і синтезувати алгоритми оптимального керування за використання чисельних методів.

Третій рівень — MINIMOD, ця модель має один компартмент, її проста структура дає змогу отримати розв'язання задачі керування за аналітичними формулами з перспективою використання в автономних пристроях підтримки прийняття рішень для корекції глікемії у хворих на діабет пацієнтів.

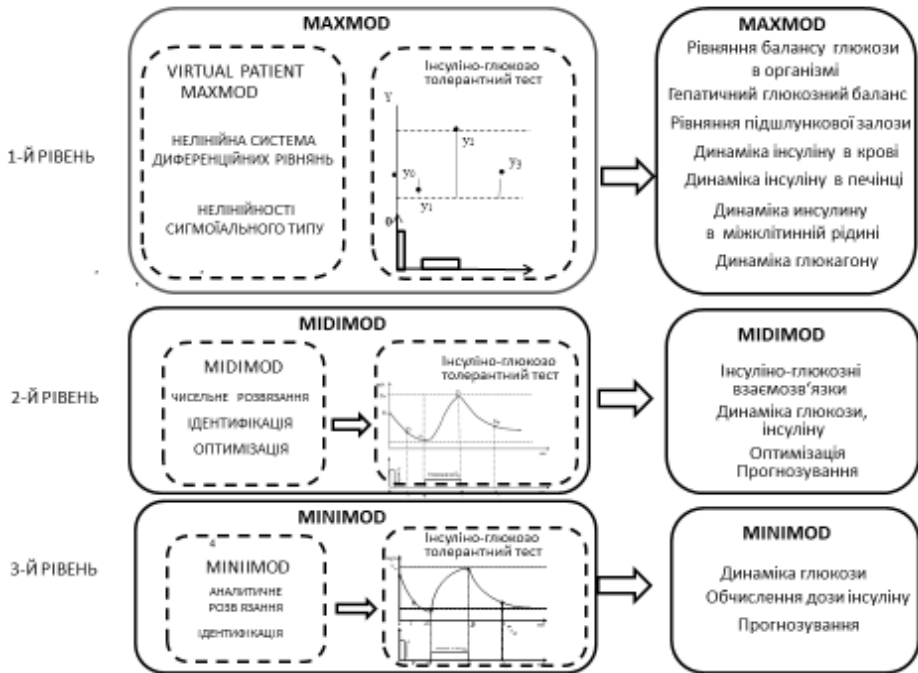


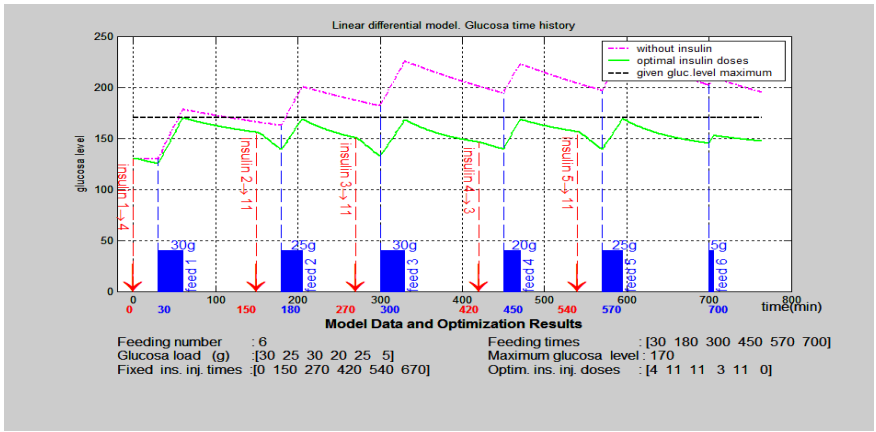
Рис. 2. Основні технологічні компоненти середовища ієрархічного моделювання

Така ієрархічна структура є зручною для проведення імітаційних досліджень.

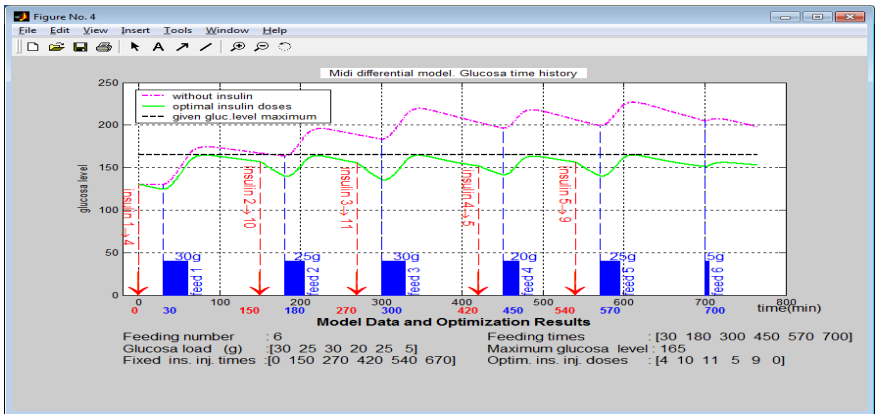
Методика доклінічних досліджень in model. Модель MAXMOD імітує реальний об'єкт, з якого реєструють вимірювання із заданою дискретністю, в якій закладено можливість реалізовувати непередбачувані похибки. За цими вимірюваннями виконують ідентифікацію параметрів моделей.

Ідентифікація моделі MIDIMOD і прогнозування глікемічного профілю на тлі передбачуваного регламенту прийому їжі, обчислення керувальних доз інсуліну за моделлю MIDIMOD здійснюють із застосуванням чисельного алгоритма оптимізації, критерієм якого є підтримка рівня глікемії в заданих межах. Відповідну послідовність алгоритмічних дій, зокрема і обчислення керувальних доз інсуліну за моделлю MINIMOD, виконують за аналітично отриманими формулами. Фрагменти графічної ілюстрації розв'язання завдань, виконаних на цьому імітаційному комплексі, наведено на Рис. 3.

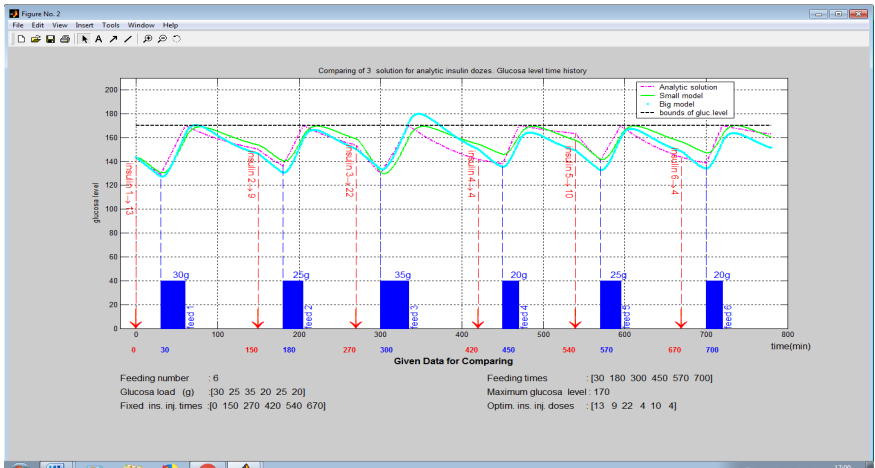
Виконане імітаційне дослідження за використання технології математичного моделювання надає можливість оцінити функціонування розроблених процедур на доклінічному етапі. Простота обчислень за аналітичними формулами може бути передумовою для реалізації алгоритму в портативних автономних пристроях спеціального призначення, або в смартзасосунках під ОС Андроїд.



a)



b)



c)

Рис.3. Ілюстрація прогнозу глікемічного профілю на тлі 6-ти прийомів їжі за використання моделей різної складності: а — модель MINIMOD і керувальні дози інсуліну, обчислені за аналітичними формулами; б — модель MIDIMOD і результати алгоритму чисельної оптимізації обчислень доз інсуліну; с — прогнозовані глікемічні профілі, отримані за моделями різної складності (MINIMOD — штрих-пунктирна лінія, MIDIMOD — штрихова і MAXMOD — суцільна крива)

Використання складних за структурою математичних моделей стало актуальним у проведенні масштабних імітаційних доклінічних випробувань, для яких використовують термін *in silico*. Доцільність використання такого підходу підтверджується тим, що Управління санітарного нагляду за якістю харчових продуктів та медикаментів США (FDA) прийняло імітаційні випробування *in silico* з глобальною моделлю як необхідний етап заміни доклінічних випробувань на тваринах перед санкціонованим дозволом випробувань безпосередньо на людях [23].

Включення в єдиний технологічний цикл комплексу математичних моделей, які функціонують одночасно, розширює коло завдань і дає змогу проаналізувати різні аспекти проблематики синтезу алгоритмів керування, які враховують неточність результатів вимірювань, різний інтервал дискретності та неадекватність прогнозних моделей, що є важливим для конструювання технічних засобів керування, актуальних у діабетології.

ВИСНОВКИ

Принцип ієрархичності як один з основних принципів системного підходу надає можливість раціональної організації наукових і прикладних досліджень.

Внаслідок використання методології системно-ієрархічного підходу до дослідження категорії здоров'я, надається можливість зробити кількісно-вербальний висновок про стан складників здоров'я, про стан здоров'я людини вцілому і збільшити роздільну здатність оцінювання резервів здоров'я за використання поняття нормоіндексу.

Ієрархічна організація структури імітаційного дослідження системи регуляції глікемії у хворих на діабет забезпечує використання в єдиному технологічному циклі комплексу математичних моделей різної складності. Запропонована технологія дає змогу ще на доклінічному етапі оцінити особливості використання алгоритмів регуляції глікемії, щоб запобігти помилок безпосередньо в практиці лікування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Rapoport A. *General System Theory: Essential Concepts & Applications*. Kent: Abacus Press, 1986. 250 p.
2. Wasson C.S., Charles S. *System engineering analysis, design, and development: Concepts, principles, and practices*. John Wiley & Sons, 2015.
3. Rebizant W., Janusz Sz., Wiszniewski A. "Fundamentals of System Analysis and Synthesis. In *Digital Signal Processing in Power System Protection and Control*. Springer, London, 2011. 29–52.
4. Von Bertalanffy L. General system theory-A critical review." *Modern systems research for the behavioral scientist*. Buckley, Walter (ed.) Aldine Publishing Co, Chicago, 1968.
5. Dantzig, T. *The Language of Science*. Edited by Joseph Mazur. Plume, New York, 2005.
6. Saaty, T. L. *The analytic hierarchy process McGraw-Hill*. New York, 1980, 324.
7. Анохин П. К. *Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем*. М.: Наука, 1971. 64 с.
8. Антомонов Ю.Г. *Принципы нейродинамики*. К.: Наукова думка, 1974. 200 с.
9. Антомонов Ю.Г. *Системы. Сложность. Динамика*. К.: Наукова думка, 1969. 127 с.
10. Антомонов Ю.Г., Кифоренко С.И., Микельская И.А. и др. *Математическая теория системы сахара крови*. К.: Наукова думка, 1971. 83 с.
11. Антомонов Ю.Г., Котова А.Б. *Введение в структурно-функциональную теорию нервной клетки*. К.: Наукова думка, 1976. 263с.

12. Антомонов Ю.Г. *Моделирование биологических систем*. Справочник. К.: Наукова думка, 1977. 260 с.
13. Методы математической биологии: учеб. пособие в 8 кн. / под общей ред. В.М. Глушкова и Ю.Г. Антомонова. К.: Вища школа., 1980–1984.
14. Антомонов Ю.Г., Белов В.М., Гриценко В.И., Котова А.Б. и др. *Открытая концепция здоровья*. Препринт ИК им. Глушкова НАН Украины. К., 1993, 26 с.
15. Гриценко В.И., Котова А.Б., Вовк М.И. и др. *Биоэкологическая медицина. Единое информационное пространство*. К.: Наукова думка, 2001. 318 с.
16. Гриценко В.И., Вовк М.И., Котова А.Б., Кіфоренко С.І., Белов В.М. *Інформаційні технології в біології та медицині*. Курс лекцій. К.: Наукова думка, 2007. 382с.
17. Белов В.М., Котова А.Б. *Здоровье человека: вызовы, методы, подходы*. К.: Наукова думка, 2017. 132 с.
18. Кіфоренко С.І., Котова А.Б. Многомерность как базис системности оценки здоровья. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2006. Вып. 150. С. 60–69.
19. Ахутин В.М., Нефедов В.П., Сахаров М.П. и др. *Инженерная физиология и моделирование систем организма*. Новосибирск: Наука, 1987.
20. Cobelli, C., & Dalla Man, C. Minimal and maximal models to quantitate glucose metabolism: tools to measure, to simulate and to run in silico clinical trials. *Journal of diabetes science and technology*, 2021, 19322968211015268.
21. Алиев Т.И. Исследование сложных систем на основе комбинированного подхода <http://simulation.su/uploads/files/default/immod-2003-1-50-55.pdf>
22. Кіфоренко С.І. Ієрархічне моделювання — основа технології доклінічних випробувань алгоритмів керування рівнем глікемії. *Кибернетика та обчислювальна техніка*. Вип.187, №1, 2017. С.80–96.
23. Dalla Man C., Micheletto F., Lv D., Breton M., Kovatchev B., Cobelli C. The UVA/PADOVA type 1 diabetes simulator: new features. *J. Diabetes Sci. Technol.* 2014; 8 (1): 26–34.

Отримано 21.02.2022

REFERENCES

1. Rapoport A. *General System Theory: Essential Concepts & Applications*. Kent: Abacus Press, 1986. 250 p.
2. Wasson, Charles S. *System engineering analysis, design, and development: Concepts, principles, and practices*. John Wiley & Sons, 2015.
3. Rebizant, Waldemar, Janusz Szafran, and Andrzej Wiszniewski. "Fundamentals of System Analysis and Synthesis. *Digital Signal Processing in Power System Protection and Control*. Springer, London, 2011. 29–52.
4. Von Bertalanffy L. General system theory — A critical review." *Modern systems research for the behavioral scientist*. Buckley, Walter (ed.) Aldine Publishing Co, Chicago. 1968.
5. Dantzig, T. *The Language of Science*. Edited by Joseph Mazur. Plume, New York. 2005.
6. Saaty, T.L. *The analytic hierarchy process* McGraw-Hill. New York, 1980, 324 p..
7. Anokhin P.K. *Fundamental questions of the general theory of functional systems*. Moscow: Science , 1971. 64 p. (In Russian)
8. Antomonov Yu.G. *Principles of neurodynamics*. Kiev: Naukova Dumka, 1974. 200 p. (In Russian)
9. Antomonov Yu.G. *Systems. Complexity. Dynamics*. Kyiv: Naukova Dumka, 1969. 127 p. (In Russian)
10. Antomonov Yu.G., Kiforenko S.I., Mikulskaia I.A. etc. *Mathematical theory of the blood sugar system*. Kiev: Naukova Dumka, 1971. 83 p. (In Russian)
11. Antomonov Yu.G., Kotova A.B. *Introduction to the structural-functional theory of the nerve cell*. Kyiv: Naukova Dumka, 1976. 263 p. (In Russian)
12. Antomonov Yu.G. *Modeling of biological systems*. Kyiv: Naukova Dumka, 1977. 260 p. (In Russian)
13. *Methods of mathematical biology*: textbook. allowance in 8 books. General ed. V.M. Glushkov and Yu.G. Antomonov. Kyiv: Vishcha school., 1980–1984. (In Russian)

14. Antomonov Yu.G., Belov V.M., Gritsenko V.I., Kotova A.B. et al. *Open concept of health*. Preprint, Glushkov Institute of cybernetics. Kyev, 1993, 26 p. (In Russian)
15. Gritsenko V.I., Kotova A.B., Vovk M.I. etc. *Bioecomedicine. United information space*. Kiev: Naukova Dumka, 2001. 318 p. (In Russian)
16. Gritsenko V.I. Vovk M.I., Kotova A.B., Kiforenko S.I., Belov V.M. *Information technologies in biology and medicine*. Course of lectures. Kyiv: Naukova Dumka, 2007. 382p. (In Ukrainian)
17. Belov V.M., Kotova A.B. *Human health: challenges, methods, approaches*. Kyiv: Naukova Dumka, 2017. 132 p. (In Russian)
18. Kiforenko S.I., Kotova A.B. Multidimensionality as a basis for systematic health assessment. *Kibernetika i vyčislitel'naâ tehnika*. 2006, Iss. 150, pp.60-69.
19. Akhutin V.M., Nefedov V.P., Sakharov M.P. and etc. *Engineering physiology and modeling of body systems*. Novosibirsk: Nauka, 1987.
20. Cobelli, C., & Dalla Man, C. Minimal and maximal models to quantitate glucose metabolism: tools to measure, to simulate and to run in silico clinical trials. *Journal of diabetes science and technology*, 2021, 19322968211015268.
21. Aliev T.I. Research of complex systems based on a combined approach <http://simulation.su/uploads/files/default/immod-2003-1-50-55.pdf> (In Russian)
22. Kiforenko S.I. Hierarchical modeling as the basis of the technology of preclinical testing of algorithms for the treatment of equal glycaemia. *Kibernetika i vyčislitel'naâ tehnika*. 2017. Iss.187, pp. 80–96. (In Ukrainian)
23. Dalla Man C., Micheletto F., Lv D., Breton M., Kovatchev B., Cobelli C. The UVA/PADOVA type 1 diabetes simulator: new features. *J. Diabetes Sci. Technol.* 2014, 8 (1): 26–34.

Received 21.02.2022

Kiforenko S.I., DSc (Biology), Senior Researcher
Leading Researcher of the Department of Application
Mathematical and Technical Methods in Biology and Medicine
ORCID: : 0000-0001-2345-6789, e-mail: skifor@ukr.net

Belov V.M., DSc (Medicine), Professor,
Head of the of the Department of Application
Mathematical and Technical Methods in Biology and Medicine
ORCID: 0000-0001-8012-9717, e-mail: motj@ukr.net

Hontar T.M., PhD (Biology), Senior Researcher,
Senior Researcher of the Department of Application
Mathematical and Technical Methods in Biology and Medicine
ORCID: 0000-0002-9239-0709, e-mail: gtm_kiev@ukr.net

International Research and Training Center for
Information Technologies and Systems of the
National Academy of Sciences of Ukraine
and Ministry of Education and Science of Ukraine,
40, Acad. Glushkov av., Kyiv, 03187, Ukraine

THE HIERARCHY PRINCIPLE AS THE BASIS OF BIOLOGICAL SYSTEMS RESEARCH

Introduction. The article illustrates the feasibility of using the methodology of a systematic approach for the rational organization of research in solving biomedical problems at the stages of diagnosis, prognosis and correction of the condition. The effectiveness of using the principle of hierarchy as one of the main organizational principles of systems analysis is illustrated by specific examples of quantitative assessment of Health and its components and in the development of hierarchical modeling technology using mathematical models of varying complexity in a single technological cycle simultaneously.

The purpose of the paper is to show the expediency of using the principle of hierarchy on the examples of developing information-structural model of health category as an integra-

tive structural concept and synthesis of hierarchical modeling technology as a basis for modern preclinical trials.

Results. *The hierarchical structure of health assessment technology has been developed, which includes conceptual level, management level: synthesis of assessment models and algorithms for calculating health reserves according to the norm index, level of synthesis of technological scaling procedures and diagnostic conclusions.*

The technology of mathematical modeling use the hierarchy of models of different complexity for simulation research of glycemic control algorithms (analytical, numerical, simulation) to predict the glycemic profile at the stage of preclinical trials.

Conclusions. *The hierarchical organization of the structure of the study of the category of health allowed to receive quantitative and verbal conclusions about the state of health reserves in general and all its components, taking into account the norm index, which increased the resolution of estimation algorithms. The proposed technology of hierarchical modeling of glycemic regulation in patients with diabetes allows to assess at the preclinical stage the peculiarities of the use of regulatory algorithms to prevent errors directly in the practice of treatment.*

Keywords: *hierarchy principle, information-structural model of the health, hierarchical modeling, glycemic control system, simulation pre-clinical trials.*

DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt207.01.087>

УДК: 615.47: 004.9

CC BY-NC

ВОВК М.І., канд. біол. наук, старш. наук. співроб.,
зав. відд. біоелектричного керування та медичної кібернетики
ORCID: 0000-0003-4584-9553, e-mail: vovk@irtc.org.ua; imvovk3940@gmail.com

КУЦЯК О.А., канд. техн. наук,
старш. наук. співроб., відд. біоелектричного керування та медичної кібернетики
ORCID: 0000-0003-2277-7411, e-mail: spirotech85@ukr.net
Міжнародний науково-навчальний центр
інформаційних технологій та систем
НАН України та МОН України,
пр. Акад. Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ КЕРУВАННЯ М'ЯЗОВИМИ ФУНКЦІЯМИ. РЕТРОСПЕКТИВНИЙ АНАЛІЗ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Вступ. Дослідження з керування м'язовими функціями визначається не тільки науковим інтересом, але й практичною необхідністю.

Мета статті — виконати ретроспективний аналіз синтезу інформаційних технологій керування м'язовими функціями людини для їхнього відновлення, корекції або навчання.

Результати. Показано еволюцію синтезу наукоємних інформаційних технологій керування м'язовими функціями з метою їхнього відновлення, корекції або навчання на базі зовнішніх контурів керування, роль яких виконують інформаційно-енергетичні сигнали міостимуляції, які надходять від електронних програмних апаратів або програмно-апаратних комплексів. Розглянуто головні класи першого покоління таких апаратів — відкриті «МІОТОН», адаптивні «МІОСТИМУЛЬ», а також сучасні — «ТРЕНАР», які містять набір базових програмних модулів активації резервів організму на відновлення м'язової активності залежно від стану рухових функцій і загального стану пацієнта. Розглянуто нову запатентовану технологію відновлення усного мовлення у пацієнтів після інсульту на базі тренувань тонкої моторики кисті. Надано нову інформаційну технологію цифрової медицини з реалізацією у «АІ-РЕАБІЛІТОЛОГ», яка для надання інформаційної допомоги користувачу (лікару) у прийнятті діагностично-лікувальних рішень з реабілітації рухових і мовленнєвих функцій використовує інструменти штучного інтелекту — спеціалізовані програмні модулі формування персоналізованого плану тренувань рухів кінцівок, тонкої моторики кисті, зокрема для відновлення усного мовлення та форми ходи за результатами кількісного оцінювання їх дефіциту. Подано результати практичного застосування розроблених інформаційних технологій, їхні переваги та перспективи розвитку.

Висновки. Головними принципами синтезу наукоємних інформаційних технологій керування м'язовими функціями з метою їхнього відновлення, корекції або навчання на базі зовнішніх контурів керування є поєднання фізичних і когнітивних впливів, активна участь суб'єкта у проведенні тренувальних процедур та їх самоконтроль.

Ключові слова: інформаційні технології, керування, апарати міостимуляції, рухи, мовлення, реабілітація, інсульт, персоналізована кількісна оцінка, критерії, штучний інтелект, програмний модуль, структурно-функціональна модель

ВСТУП

Становлення і розвиток досліджень з керування рухами визначалися не лише науковим інтересом, а й практичною необхідністю. Рухова активність є винятково важливим, фундаментальним чинником формування, збереження, зміцнення здоров'я та гармонійного розвитку людини, 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 «омолодження». Інсульт — основна причина інвалідності дорослого населення. Дитячий церебральний параліч (ДЦП) залишається головною причиною інвалідності серед дітей. Розроблення ефективних методів керування рухами для відновлення рухової спроможності не перестає бути актуальною задачею.

Об'єкт досліджень: процеси керування відновленням загальних рухів кінцівок, тонкої моторики кисті, усного мовлення, координацією активності м'язів.

Методи: структурно-функціональне моделювання, програмна міоелектростимуляція, біологічний зворотний зв'язок, багатокритеріальний вибір параметрів тренувань рухів, інформаційно-структурне моделювання, об'єктно-орієнтоване проектування, алгебра логіки.

Мета статті: виконати ретроспективний аналіз синтезу інформаційних технологій керування м'язовими функціями людини для їхнього відновлення, корекції або навчання.

СТАНОВЛЕННЯ ТА РОЗВИТОК НАПРЯМУ БІОЕЛЕКТРИЧНОГО КЕРУВАННЯ М'ЯЗОВИМИ ФУНКЦІЯМИ ЛЮДИНИ (1964-1997 РР.)

Дослідження, спрямовані на керування рухами людини, започатковано ще у стінах Обчислювального Центру АН УРСР у відділі біологічної кібернетики, яким завідував академік М.М. Амосов. Стояло завдання — розробити теорію керування основними функціями і органами живих організмів на основі біоелектростимуляції, і в його рамках сформувався напрям біоелектричного керування руховими функціями. Таке керування використовує в якості команд і сигналів зворотного зв'язку оброблені електроміографічні (ЕМГ) сигнали. З 1964 р. цей напрям отримав цілеспрямований розвиток в Інституті кібернетики АН України, в лабораторії керування руховими реакціями в живих організмах, з 1969 р. — у відділі біоелектричного керування і медичної кібернетики. З травня 1997 р. продовжує плідно розвиватися в Міжнародному центрі інформаційних технологій та систем НАН України і МОН України у згаданому відділі. З 1964 р. до 2009 р. на чолі досліджень стояв доктор медичних наук, професор Л.С. 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 у 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.

«МІОТОН». *Багатоканальні пристрої біоелектричного керування рухами людини.* Важливим етапом у розвитку програмної міоелектростимуляції став перехід до використання в якості програми (моделі активації м'язів, які втягуються в рух) оброблених ЕМГ сигналів здорових довільних рухів. Такий спосіб керування рухами застосовано у пристроях типу «МІОТОН» [1–3]. У 1965 р. в Інституті кібернетики АН УРСР виготовлено перший експериментальний зразок багатоканального пристрою біоелектричного керування рухами людини «МІОТОН». Використання оброблених ЕМГ сигналів здорових довільних рухів як програм вже на цьому етапі пов'язано з поняттям «біоелектричного образу руху» як моделі (програми) формування примусових м'язових скорочень під впливом програмної міоелектростимуляції [3].

У 1967–1970 рр. виготовлено дослідні зразки 6-канального апарата «МІОТОН-2», який включено до номенклатури дозволених для застосування у медичній практиці і серійного виробництва виробів медичної техніки (Ресстраційне посвідчення № 77/29/13 від 4.02.1977 р.). Результатом модернізації апарата «МІОТОН-2» було створення апаратів «Міотон-3М», 1983 р. та «МІОТОН-604» з покращеними технічними характеристиками і сервісними функціями [4]. Апарати типу «МІОТОН» широко використовують в клініках і курортах колишнього СРСР для відновлення рухових функцій, пошкоджених патологією центральної і периферичної нервової системи [3].

У рамках співпраці з НПКФ «Біокор-інформатика» при Інституті кібернетики імені В.М. Глушкова АН УРСР розроблено, поставлено на виробництво і використано в медичних установах України 6-канальний програмний біоелектричний стимулятор «МІОКОР-МК-01» (1991 р.). Особливістю апарата порівняно з апаратами типу «МІОТОН» є наявність банку штучно синтезованих програм керування, які враховують найхарактерніші залучення м'язів у виконання різних рухів.

«МІОСТИМУЛ». *Багатоканальні пристрої адаптивного біоелектричного керування рухами людини.* Введення зворотних зв'язків в електронні системи керування рухами дало змогу перейти до нового класу апаратів, які реалізують принципи адаптивного керування. Адаптивний підхід є корисним в умовах великої початкової невизначеності, а також у системах керування об'єктами з характеристиками, що 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 істотний розкид; параметри м'язової активності істотно відрізняються у разі патології і зазнають змін у процесі електростимуляції. Адаптивне керування передбачає автоматичне підлаштування параметрів сигналу стимуляції під функційний стан м'язів, які стимулюються. Принципи адаптивного керування реалізовано в 6-канальному апараті «МІОСТИМУЛ», який містить два види зворотного зв'язку: перший — для

автоматичного регулювання динамічного діапазону сигналу стимуляції [5], другий — для зменшення рівня сигналу стимуляції або відключення стимуляції, коли настає стомлення стимульованих м'язів [6]. Технологія адаптивного керування захищена патентами США, Англії, Німеччини Франції, Канади, Швеції, Італії, Югославії, наприклад [7].

РОЗВИТОК ПЕРСОНАЛІЗОВАНОГО ПІДХОДУ ДО КЕРУВАННЯ М'ЯЗОВИМИ ФУНКЦІЯМИ (1997–2022 РР.)

Індивідуальний підхід до лікування є одним з пріоритетних напрямів у сучасній системі охорони здоров'я. Реабілітація — це насамперед мобілізація резервів організму на відновлення функції, порушеної внаслідок патології. Використання сучасних інформаційних технологій (ІТ) створює нові можливості вибору індивідуального «маршруту» лікування. У разі відновлення рухових функцій мобілізація резервів передбачає розроблення та реалізацію індивідуальних комплексних програм медичної реабілітації, в яких поряд з лікарськими засобами провідне місце займають технології персоналізованого тренування/керування рухами на основі зовнішніх контурів. Такі зовнішні контури виконують роль відсутньої ланки у формуванні/коригуванні гомеостазу рухової системи та забезпечують функції сприйняття, передачі знань про рух, формування, регулювання і контролювання рухів. За вимогами до синтезу зовнішніх контурів керування м'язовими функціями сформульовано принципи організації персоналізованого підходу до біологічно адекватного запуску і стимуляції резервів організму на відновлення рухів та розроблено критерії, які забезпечують виконання цих принципів [8].

Технологія «ТРЕНАР®». *Методи та індивідуальні програми активзації резервів організму на відновлення рухових функцій.* Персоналізований 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*. Ці методи є основою синтезу біоінформаційної технології відновлення рухових і мовленнєвих функцій ТРЕНАР®. Технологію реалізує новий клас електронних засобів цифрової медицини: «Апарат для електростимуляції з біокеруванням Тренар-01» і «Апарат для електростимуляції з біологічним зворотним зв'язком Тренар-02» (рис. 1) [8].



Рис. 1. а) — Комплекс «ТРЕНАР»: апарати Тренар-01 і Тренари-02, б) — тренування рухів за програмою "Донор" і методом порогової стимуляції

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

Програмно-технологічний модуль «Синтез». Його завдання — тренування примусових рухів під впливом електростимуляції м'язів за штучно синтезованими програмами у широкому діапазоні «надсилання — пауза» імпульсів електростимуляції. Модуль застосовують на ранніх етапах реабілітації, зокрема майже за відсутності рухів ураженої кінцівки.

Програмно-технологічний модуль «Донор». Його завдання — тренування примусових рухів ураженої кінцівки під впливом електростимуляції відповідних м'язів за програмами, «зчитаними» 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 та здійснює контроль її виконання. Інформаційний потік, що йде у пошкоджену моторну зону кори головного мозку, складається з пропріоцептивних імпульсів як від довільних скорочень-розслаблень м'язів здорової кінцівки, так і від примусових скорочень-розслаблень м'язів пошкодженої кінцівки. 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». Його завдання — тренування співвідношення довільно-примусових скорочень м'язів. Тренування спрямовано на те, щоб з кожним новим сеансом довільне скорочення м'язів долало все більший поріг ЕМГ сигналу, який виникає за умови довільного скорочення м'язів, що тренуються. Метод порогової електростимуляції застосовують у разі появи у пацієнта найменших ознак довільних рухів за відсутності порушень когнітивної сфери.

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

Програмно-технологічний модуль «Біотренування». За цією програмою на основі біологічного зворотного зв'язку (БЗЗ), зорового і слухового за ЕМГ, пацієнт тренує довільні скорочення м'язів відповідно до встановленого пацієнтом або інструктором (лікарем) тренувального завдання. У разі використання методу БЗЗ мотивація є ключовою у процесі аферентного синтезу. Програму «Біотренування» за цим методом зазвичай використовують на останніх етапах реабілітації для наближення рухів пацієнта до норми. Важливо, що цю програму можна використовувати за наявності у пацієнта певних протипоказань до електростимуляції, наприклад кардіостимулятора.

Таблиця 1. Ефективність відновлення рухів за програмами технології ТРЕНАР®

Нозологія	Кількість пацієнтів	Ефективність лікування: кількість пацієнтів, (%)		
		Значне покращення	Покращення	Без змін
Наслідки інсульту	4855	1214 (25 %)	3301 (68 %)	340 (7 %)
ДЦП	633	101 (16 %)	494 (78 %)	38 (6 %)
Неврит лицевого нерва	1139	433 (38 %)	581 (51 %)	125 (11 %)
Невропатії	1329	465 (35 %)	758 (57%)	106 (8%)
Наслідки патологій хребта	5487	4553 (83 %)	879 (16%)	55 (1%)
Інше	7069	4595 (65 %)	2333 (33 %)	141 (2%)
Всього:	20512	11361 (55 %)	8346 (41 %)	845 (4 %)

Методологія, яка поєднує використання «ЕМГ 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 електростимуляції, БЗЗ), сприяє утворенню нових умовно рефлекторних комплексів під дією *впливів як фізичних, так і когнітивних*.

Комплекс ТРЕНАР® захищено патентами України, свідоцтвами про реєстрацію авторського права на твір, на комп'ютерні програми, на знак для товарів і послуг TRENAR, має переваги перед аналогами за гамою функцій (методами та програмами відновного лікування рухів), що підвищує ефективність реабілітації, розширює сферу застосування за меншої (в 7–10 разів) вартості. Електронні медичні вироби «ТРЕНАР-01» і «ТРЕНАР-02» отримали відповідні Свідоцтва про Державну реєстрацію № 13235/2013, № 12121/2012, внесені до Державного реєстру медичної техніки та виробів медичного призначення України (рис. 1). Їх використовують у клінічних, поліклінічних, санаторно-клінічних закладах, сімейні лікарі і приватні особи. Загальна кількість пролікованих пацієнтів, дорослих і дітей, становить понад 20 тис. осіб. Ефективність лікування рухів доведена за різноманітної патології, зокрема з наслідками інсульту та ДЦП (Таблиця 1).

«ПРОМОВА». *Комп'ютерний програмно-апаратний комплекс персонального відновлення мовлення.* Наслідками інсульту є не лише розлади рухових функцій, але й мовленнєві порушення, серед яких одним з найпоширеніших є моторна афазія внаслідок ураження моторної мовленнєвої зони кори головного мозку, де формується рухова програма мовленнєвого висловлення. Хворий втрачає можливість говорити через порушення рухових команд подібно до розладів рухових функцій після інсульту, спричинених порушенням рухових команд у моторних зонах кори головного мозку, нейрони яких організують руховий акт. М'язові рухи мовленнєвого апарата є одними з видів довільних м'язових рухів. Наявність мовленнєвого дефекту знижує комунікативні можливості хворих, сприяє їхній соціальній ізоляції. Синтез ефективних методів і технологій відновлення усного мовлення, розроблення

інструментарію для їхнього швидкого та якісного впровадження є актуальним науково-прикладним завданням. Зв'язок рухових і мовленнєвих функцій, проєкція кисті у корі головного мозку, 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 основі 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 [9, 10].

Технологія відновлення мовленнєвих функцій використовує методи і програми тренувань кисті і пальців, які надає апаратно-програмний комплекс «ТРЕНАР®». Рухи пальців рук для тренування вибирають за критеріями розвитку тонкої моторики кисті в онтогенезі, доступності передачі сигналів електростимуляції відповідним м'язам за допомогою поверхневих електродів, стану рухів кисті та пальців після інсульту. Технологію реалізує комп'ютерний програмно-апаратний комплекс персонального відновлення мовлення «ПРОМОВА-2» [11].

Центральною ланкою комплексу є технічна система, яка складається з двох компонентів: електронні апарати керування рухами «ТРЕНАР-01» і «ТРЕНАР-02», за допомогою яких здійснюють тренування рухів тонкої моторики ураженої кисті і пальців, та інформаційний компонент — спеціалізований програмний модуль «ProMova 1.2», реалізований для персонального комп'ютера (ПК). Включення у технічну систему інформаційного компонента зумовлено проблемою багатокритеріального вибору параметрів тренувань, який здійснює лікар під час організації індивідуального підходу до реабілітації. Позитивні результати використання комплексу «ПРОМОВА-2» показали покращення функції моторного компонента мовлення порівняно з базовим курсом реабілітації на 32,5 % ($p < 0,02$), що дає підставу для включення інформаційної технології (ІТ) відновлення мовлення до обов'язкового комплексу реабілітаційних заходів. Проте наведені показники відображають якісну оцінку експертів.

Масове використання комплексу «ПРОМОВА-2» значною мірою визначається об'єктивним оцінюванням динаміки дефіциту мовленнєвих функцій внаслідок реабілітаційних заходів, важливе значення в якій має кількісна оцінка дефіциту мовленнєвих функцій за доказовими критеріями. Таке оцінювання є важливим складником цифрової медицини, допомагає лікарю оцінити ефективність реабілітаційного процесу та формувати індивідуальний план реабілітації на основі об'єктивного оцінювання. Не менш важливим для впровадження є забезпечення зручності взаємодії користувача з комп'ютерним комплексом.

«AI – РЕАБІЛІТОЛОГ». *Інтелектуальна ІТ формування персоналізованого плану реабілітації рухів після інсульту.* Застосування технології ТРЕНАР® у відновному лікуванні рухів показало високий ступінь покращень рухових функцій, оцінений експертним шляхом (табл. 1). Проте для об'єктивізації оцінювання ефективності реабілітаційного процесу розроблено методику кількісного оцінювання дефіциту рухових функцій у пацієнтів, яка пройшла клінічну апробацію у пацієнтів після інсульту [12]. Така методика створена на основі тестових методів експертного оцінювання

дефіциту рухових функцій за доказовими критеріями, оскільки не кожна клінічна установа має відповідні інструментальні засоби оцінювання дефіциту рухових функцій. Для оцінювання дефіциту вибрано такі основні та додаткові критерії з відповідними шкалами оцінювання, які мають однакову шестибальну градацію та зіставляються зі шкалою динаміки парезу (що є зручним для формування інтегрального кількісного оцінювання дефіциту рухових функцій) [13]:

- основні: оцінювання за критеріями сили м'язів — за шкалою L. McPeak, M. Вейсс [14], та обсягу рухів — за шкалою Л. Столярової [13] проксимальних та дистальних відділів кінцівок на рівні суглобів (плечового, ліктьового, променево-зап'ясткового — для верхньої кінцівки, а також кульшового, колінного, гомілково-ступневого — для нижньої кінцівки);

- додаткові: оцінювання ходи за критерієм форми ходи та моторики кисті руки за критеріями: протиставлення великого пальця (протиставлення дистальної фаланги великого пальця основі інших), згинання пальців у кулак, основної функції кисті (схоплення і втримування предметів), розгинання пальців кисті [15, 16].

Також оцінюють тонус м'язів: гіпертонус — за модифікованою шкалою Ашфорт; гіпотонус — за спеціально запропонованою шестибальною шкалою [12]. Тонус м'язів не входить в інтегральну кількісну оцінку дефіциту рухових функцій, але має діагностичне значення у створенні персоналізованого плану реабілітаційних заходів пацієнтів після інсульту.

Експертне оцінювання уражених кінцівок виконують відносно власних здорових кінцівок пацієнта, рухові функції яких характеризують індивідуальну норму відсутності порушень [12].

Для зручності використання лікарями-неврологами цієї методики розроблено Протокол оцінювання дефіциту рухових функцій кінцівок та ефективності їхньої реабілітації у пацієнтів, які перенесли інсульт, з відповідними таблицями оцінювання дефіциту рухових функцій за основними та додатковими доказовими критеріями, оцінювання тонусу м'язів (гіпертонус і гіпотонус), сумарного кількісного оцінювання дефіциту рухових функцій з прив'язкою до ступеня парезу та ефективності відновлення моторних функцій [12]. Ефективність реабілітації визначають порівнянюючи дефіцит рухових функцій до і після реабілітації.

Кількісне оцінювання дефіциту рухових функцій відіграє важливу роль у цифровій медицині. Така оцінка допомагає лікарю зменшити помилку в оцінюванні перебігу та ефективності реабілітаційного процесу, а також є основою синтезу мобільних засобів інформаційно-консультаційної допомоги лікарю у формуванні та внесенні корективів до індивідуального плану відновлення пошкоджених патологією функцій на різних етапах реабілітації.

За отриманими показниками кількісного оцінювання дефіциту рухових функцій з урахуванням неврологічного статусу і супутніх захворювань пацієнта формується персоналізований рекомендований план тренування рухів для їхнього відновлення — багатокритеріальне визначення за пріоритетом рухів і тривалості їх тренувань, методів та програм тренувань апаратами ТРЕНАР® з наданням пріоритету методу, програмі тренувань, що впливає з принципу біологічно адекватної активації додаткових резервів організму на відновлення рухів на поточному етапі реабілітації пацієнта.



Рис. 2. Структурно-функціональна модель взаємодії лікаря з пацієнтом і програмно-апаратним комплексом AI «РЕАБІЛІТОЛОГ»

Для визначення складників плану тренувань рухів застосовують розроблені із застосуванням алгебри логіки вирішувальні правила на основі змінних, які відповідають неврологічному статусу, супутнім захворюванням пацієнта критеріям та показникам дефіциту рухових функцій та ступеня м'язового тону, а також критеріям дозволу-обмеження-заборони тренування рухів пацієнта.

Практична реалізація. Методика кількісного оцінювання дефіциту рухових функцій та метод формування персоналізованого рекомендованого плану тренування рухів за технологією ТРЕНАР® втілено в інтелектуальну інформаційну технологію формування персоналізованого плану реабілітації рухів після інсульту. Цю технологію реалізує програмно-апаратний комплекс AI «РЕАБІЛІТОЛОГ» (рис. 2), який для надання інформаційної допомоги користувачу (лікаря) у прийнятті діагностично-лікувальних рішень використовує інструменти штучного інтелекту — спеціалізований програмний модуль формування рекомендованого персоналізованого плану тренувань рухів «MovementRehabStroke» [16, 17] апаратами ТРЕНАР® за результатами кількісного оцінювання дефіциту рухових функцій програмним модулем «MovementTestStroke» [18] з урахуванням загального стану пацієнта.

Програмні модулі реалізовано для структур ПК та мобільних Android-платформ з використанням відповідних структурно-функціональних моделей, алгоритмів та UML-діаграм діяльності.

Сформований програмно персоналізований план тренування рухів може бути скориговано лікарем. Тренування рухів за цим планом забезпечує запуск і стимуляцію резервів організму на відновлення рухів залежно від

глибини їхніх порушень, неврологічного статусу, показників психо-емоційного стану, супутніх захворювань та етапу реабілітації пацієнта.

Головними перевагами інтелектуальної інформаційної технології формування персоналізованого плану реабілітації рухів «АІ - РЕАБІЛІТОЛОГ» є:

- розширення гами діагностики дефіциту рухів: розподілене та інтегральне кількісне оцінювання за доказовими критеріями на рівні суглобів проксимальних і дистальних відділів верхньої та нижньої кінцівок, тонкої моторики кисті та форми ходи;

- можливість виявляти специфіку порушень рухів внаслідок інсульту;
- персоналізація профілактичних і реабілітаційних заходів;
- збереження повної інформації про пацієнта у базі даних: інформації з медичної карти пацієнта відповідно до стандарту, а також спеціалізованої інформації: чинників заборони/обмежень тренувань рухів, первинної кількісної експертної оцінки дефіциту рухів, інтегральної кількісної оцінки дефіциту рухів до і після реабілітації, ефективності реабілітації; рекомендованих та скоригованих лікарем персоналізованих планів реабілітації рухів.

Уся ця інформація за запитом користувача виводиться на інтерфейс у зручній формі.

Результати апробації технології «АІ-РЕАБІЛІТОЛОГ» підтвердили доцільність її використання у клінічній практиці, а також показали, що розроблена методика кількісного оцінювання глибини і специфіки порушень у динаміці сприяє запобіганню розвитку ускладнень і, як наслідок, зменшенню ризику набутої інвалідності [13].

Апарати міостимуляції. Перспективним новим класом апаратів міостимуляції, розроблених за останній час, є макети 4-канальних програмних міоелектростимуляторів персоналізованого формування складних координованих рухів кінцівок «ТренКорСинтез» і «МіоАктивСинтез», а також програмно-апаратний комплекс діагностики і корекції дефектів постави «МіоБалансСтимул». На відміну від наявних апарати «ТренКорСинтез» і «МіоАктивСинтез» мають гнучку архітектуру синтезу програм залучення м'язів у виконання складного руху, містять інтерфейси з відображенням сформованої програми (моделі) руху, що допомагає оператору і пацієнту відпрацьовувати окремі фази руху. Особливістю комплексу «МіоБалансСтимул» є використання двох методів корекції — біологічного зворотного зв'язку і програмної міоелектростимуляції, що сприяє активації додаткових резервів організму на відновлення симетрії активності м'язів спини, які формують вертикальну орієнтацію хребта.

Впровадження технологій цифрової медицини для відновного лікування рухових і мовленнєвих функцій супроводжувалось організаційною та консультативною діяльністю. Плідна співпраця з медичними закладами сприяла вдосконаленню технологій.

ВИСНОВКИ

Еволюція синтезу наукоємних інформаційних технологій керування м'язовими функціями з метою їхнього відновлення, корекції або навчання на основі зовнішніх контурів керування пройшла два головних етапи.

На першому етапі — від 6-канальних програмних біоелектричних стимуляторів «МІОТОН» та «МІОКОР-МК-01» до адаптивних «МІОСТИМУЛ». «МІОТОН» — це перші апарати, в яких використано багатоканальну міоелектростимуляцію нервово-м'язового комплексу за програмами у вигляді перетворених ЕМГ сигналів однойменних м'язів іншої людини. Це дозволило нав'язувати рухи, близькі до природних, і покращувати відновлення рухових функцій після важких захворювань центральної і периферичної нервової системи. Особливістю апарата «МІОКОР-МК-01» порівняно з «МІОТОН» є наявність банку штучно синтезованих програм керування, які враховують найхарактерніші залучення м'язів у виконання різних рухів. Перевагами 6-канального апарата «МІОСТИМУЛ» є введення зворотних зв'язків (результати керування-параметри керування), що дало змогу підвищити відповідність нав'язаного руху програмному і уникнути втоми м'язів внаслідок тренувальних процедур.

На другому етапі синтез наукоємних інформаційних технологій було спрямовано на розвиток персоналізованого підходу до керування м'язовими функціями — від нового класу електронних апаратів цифрової медицини ТРЕНАР® до програмно-апаратних комп'ютерних комплексів «ПРОМОВА» та «АІ-РЕАБІЛІТОЛОГ». У двох останніх для надання інформаційної допомоги користувачу (лікаря) у прийнятті лікувальних рішень використано інструменти штучного інтелекту.

Головною перевагою апаратів ТРЕНАР® є можливість організувати персоналізований, біологічно адекватний підхід до відновлення рухових і мовленнєвих функцій залежно від глибини патології та етапу реабілітації. Персоналізація досягається за рахунок використання оригінальних програм формування м'язових рухів на базі різних методів. Програми «Донор», «Поріг», «Біотренування» передбачають активну участь пацієнта у тренуванні, дають змогу уникати монотонних процедур, самостійно перебудовувати ритм і обсяг рухів, що тренуються, поступово ускладнювати тренувальне завдання. Все це сприяє реабілітації.

Застосування запатентованої технології відновлення усного мовлення на основі тренувань тонкої моторики кисті у хворих після інсульту з використанням комп'ютерного програмно-апаратного комплексу «ПРОМОВА» уможливило збільшення ефективності відновлення усного мовлення порівняно з базовим курсом реабілітації.

Застосування інтелектуальної ІТ «АІ-РЕАБІЛІТОЛОГ», яка для надання інформаційної допомоги користувачу (лікаря) у прийнятті лікувальних рішень використовує інструменти штучного інтелекту — спеціалізовані програмні модулі формування персоналізованого плану тренувань рухів за результатом кількісного оцінювання їхнього дефіциту, сприяє зменшенню помилки лікаря, запобіганню розвитку ускладнень, підвищенню ефективності оздоровчих послуг пацієнтам після інсульту. Програмна реалізація технології для структур ПК і мобільних Android-платформ уможливило застосування таких ІТ як у клінічних закладах, так і в домашніх умовах. На відміну від відомих аналогів допомагає виявляти особливості порушень рухових функцій кінцівок, форми ходи, тонкої моторики кисті, яка впливає на відновлення мовлення, а також уможливило діагностування порушень рухових функцій не тільки після інсульту, але й за наявності пухлин і

травм головного мозку. Ця технологія започаткувала створення нового класу мобільних засобів цифрової медицини діагностики та персоналізованих планів тренування рухів.

Результати досліджень можуть бути корисними для цивільної та військової медицини, фізіології праці, космонавтики, ергономіки, фізіології спорту. Розроблені технології можна адаптувати для використання в екзоскелетах для підсилення функції слабких м'язів інвалідів, для програмування дій робототехнічних систем, нормалізації рухів після перебування людини у невагомості тощо.

ЛІТЕРАТУРА

1. А.С. Способ управления двигательными реакциями / Л.С. Алеев, С.Г. Бунимович (СССР); № 1019769/31-16; опубл. 29.12.66, Бюл. №2
2. Алеев Л.С. Биоелектрична 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 движениями. Киев: Наук. думка, 1980. 142 с.
4. А.С. Способ управления движениями человека / Л.Алеев, С.Бунимович, М.Вовк, В.Горбанев, А.Шевченко (СССР); № 321245; 3.09. 1981.
5. А.С. Многоканальное устройство адаптивного биоэлектрического управления движениями человека / Л. Алеев, М.Вовк, В.Горбаньов, А.Шевченко (СССР); № 929 054; 23.05.1982.
6. А.С. Многоканальное устройство адаптивного биоэлектрического управления движениями человека / Л. Алеев, М.Вовк, В.Горбаньов, А.Шевченко (СССР); № 976 952; 03.08.1982.
7. United States Patent. Bioelectrically controlled electric stimulator of human muscles / L. Aleev, S. Bunin, M. Vovk, V. Gorbaney, A. Shevchenko, F. Balchev; No 4, 165, 750; 28.08.1979.
8. Гриценко В., Котова А., Вовк М., Кіфоренко С., Белов В. Інформаційні технології в біології та медицині. Курс лекцій. Київ: Наукова думка, 2007. 382 с.
9. Вовк М.І., Галян Є.Б. Восстановление моторного компонента речи на базе управления мышечными движениями. Теоретическое обоснование. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2012. Вып. 167. С. 51–60.
10. Патент. Спосіб лікування мовних порушень / М.І. Вовк, Є.Б. Галян, О.М. Підпригора (Україна); № 111388; опубл. 25.04.2016, Бюл. № 18 (in Ukrainian)
11. Vovk, M.I., Halian, Ye.B., Kutsiak, O.A. Computer Software & Hardware Complex for Personal Oral Speech Restoration after a Stroke. *Sci. innov.* 2020. Vol. 16, № 1(91). pp. 54–68. <https://doi.org/10.15407/scine15.05.054>
12. Vovk M.I., Kutsyak O.A. Software module for personal diagnostics of motor functions after stroke. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2019. № 4 (198). P. 62–77
13. Вовк М.І., Куцяк О.А., Лаута А.Д., Овчаренко М.А. Інформаційний супровід досліджень динаміки відновлення рухів після інсульту. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2017. Вип. 3 (189). С. 61–78.
14. Белова А., Щепетова О. Шкалы, тесты и опросники в медицинской реабилитации. Москва: Антидор, 2002. 440 с.
15. Смычек В.Б., Пономарева Е.Н. Черепно-мозговая травма (клиника, лечение, экспертиза, реабилитация). Минск: НИИ МЭ и Р, 2010. 430 с.
16. Vovk M.I., Kutsyak O.A. Information technology for forming a personal movement rehabilitation plan after a stroke. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2020. № 3 (201). P. 87–99.
17. Vovk M.I., Kutsyak O.A. Mobile AI-technology for forming the personalized movements rehabilitation plan after a stroke. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2021. № 4 (206). P. 73–88.
18. Vovk M.I., Kutsyak O.A. AI-technology of motor functions diagnostics after a stroke. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2021. № 2 (204). P. 84–100.

Отримано 24.03.2021

REFERENCES

1. Inventor's certificate. The method of motor control / L. Aleev, S. Bunimovich (USSR); No 1019769/31-16; 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, Issue 4, pp. 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. The method of motor control of a person / L. Aleev, S. Bunimovich, M. Vovk, V. Gorbanev, A. Shevchenko (USSR); No 321 245; 03.09.1981. (in Russian).
5. Inventor's certificate. Multichannel device for adaptive bioelectrical motor control of a person / L. Aleev, M. Vovk, V. Goranev, A. Shevchenko (USSR); No 929 054; 23.05.1982. (in Russian).
6. Inventor's certificate. Multichannel device for adaptive bioelectrical motor control of a person / L. Aleev, M. Vovk, V. Goranev, A. Shevchenko (USSR); No 976 952; 03.08.1982. (in Russian).
7. United States Patent. Bioelectrically controlled electric stimulator of human muscles / L. Aleev, S. Bunin, M. Vovk, V. Gorbanev, A. Shevchenko, F. Balchev; No 4, 165, 750; 28.08.1979.
8. V. Hrytsenko, A. Kotova, M. Vovk, S. Kiforenko, V. Bielov. Information technology in Biology and Medicine. Lecture course. Kyiv, 2007, 382 p. (in Ukrainian).
9. Vovk M.I., Kutsyak O.A. Software module for personal diagnostics of motor functions after stroke. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2019, № 4 (198), pp. 62–77
10. Patent. A method of treating speech disorders / M.I. Vovk, Ye.B. Halian, O.M. Pidopryhora (*Ukraine*); № 111388; published 25.04.2016, Bulletin no 18 (in Ukrainian)
11. Vovk, M.I., Halian, Ye.B., Kutsiak, O.A. Computer Software & Hardware Complex for Personal Oral Speech Restoration after a Stroke. *Sci. innov.* 2020, Vol. 16, № 1(91), pp. 54–68. <https://doi.org/10.15407/scine15.05.054>
12. Vovk M.I., Kutsyak O.A. Software module for personal diagnostics of motor functions after stroke. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2019, № 4 (198), pp. 62–77
13. Vovk M.I., Kutsiak O.A., Lauta A.D., Ovcharenko M.A. Information Assistance of Researches on the Dynamics of Movement Restoration After the Stroke. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2017, № 3 (189), pp. 61–78. (in Ukrainian)
14. Belova A., Shchepetova O. Scales, tests and questionnaires in medical rehabilitation. Moscow: Antidor, 2002, 440 p. (in Russian)
15. Smychek V., Ponomareva E. Craniocerebral trauma (clinic, treatment, examination, rehabilitation). Minsk: Research Institute of ME and R, 2010, 430 p. (in Russian)
16. Vovk M.I., Kutsyak O.A. Information technology for forming a personal movement rehabilitation plan after a stroke. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2020, № 3 (201), pp. 87–99.
17. Vovk M.I., Kutsyak O.A. Mobile AI-technology for forming the personalized movements rehabilitation plan after a stroke. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2021, № 4 (206), pp. 73–88.
18. Vovk M.I., Kutsyak O.A. AI-technology of motor functions diagnostics after a stroke. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2021, № 2 (204), pp. 84–100.

Received 24.03.2021

Vovk M.I., PhD (Biology), Senior Researcher,
Head of Bioelectrical Control & Medical Cybernetics Department
ORCID: 0000-0003-4584-9553, e-mail: vovk@irtc.org.ua; invovk3940@gmail.com
Kutsiak O.A., PhD (Engineering),
Senior Researcher of the Bioelectrical Control & Medical Cybernetics Department
ORCID: 0000-0003-2277-7411, e-mail: spirotech85@ukr.net
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,
the Department of Complex Research of Information Technologies,
40, Acad. Glushkov av., Kyiv, 03187, Ukraine

INFORMATION TECHNOLOGIES FOR MUSCLE FUNCTIONS CONTROL. RETROSPECTIVE ANALYSIS AND DEVELOPMENT PROSPECTS

Introduction. *The research on muscle functions control is determined not only by scientific interest but also by practical necessity.*

The purpose of the paper is to conduct a retrospective analysis of the synthesis of information technologies for the control of human muscle functions for their recovery, correction or training.

Results. *The evolution of the synthesis of high technologies for muscle functions control with the purpose for recovering, correcting or training them on the basis of external control circuits is presented. Information and energy signals of myostimulation play the role of these loops. The signals come from electronic software devices or information software and hardware complexes. The main classes of the first generation of such devices, namely an open one ("MIOTON"), adaptive ("MIOSTIMUL"), and modern "TRENAR" are considered. The devices contain a set of basic software modules for activating the patient's reserves to recover muscle activity depending on the motor functions state and the patient's general state. The new patented technology for oral speech recovery after stroke based on training the fine motor skills of the hand is considered. The new information technology of digital medicine "AI-REABILITOLOG" is presented. To aid a user (physician) in making diagnostic and treatment decisions on rehabilitation of motor and speech functions the technology uses artificial intelligence tools: specialized software modules for creating a personalized training plan of extremities, fine motor skills of the hand, in particular for oral speech and gait recovery based on the quantitative assessment of these disorders. The results of practical application, the advantages of the developed information technologies are presented. The prospects for their development are considered.*

Conclusions. *The main principles for synthesis of high technologies for muscle functions control in order to recover, correct or train them on the basis of external control circuits are a combination of physical and cognitive influences, active participation of a person in training procedures and their self-control.*

Keywords: *information technologies, control, myostimulation devices, movements, speech, rehabilitation, stroke, personalized quantitative assessment, criteria, artificial intelligence, software module, structural and functional model*

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

Цільова аудиторія — науковці, інженери, аспіранти і студенти вищих навчальних закладів відповідного фаху.

Вимоги до рукописів статей

1. Рукопис надають на папері у двох примірниках (мова — англійська, українська, 17–22 с.) та електронна версія. До рукопису додають:

- анотації — українською та англійською мовами (прізвище, ініціали автора/ів, науковий ступінь, звання, посада, місце роботи, адреса організації, назва статті, текст 250–300 слів, з виділенням рубрик: вступ, мета, результати, висновки, ключові слова);
- список літератури мовою оригіналу — у порядку згадування у тексті, за стандартом ДСТУ 8302:2015;
- список літератури — переклад джерел англійською мовою, прізвища та ініціали авторів — транслітерація;
- ліцензійний договір;
- відомості про автора/ів українською та англійською мовами повинні містити: ПІБ, науковий ступінь, вчене звання, посада, відділ, місце роботи, поштова адреса організації, телефон (для зв'язку редактора), E-mail, авторські ідентифікатори ORCID або ResearcherID.

2. Текст статті подається з обов'язковими рубриками: вступ, постановка завдання/проблеми, мета, результати, чітко сформульовані висновки.

Вимоги до текстового файлу

Формат файлу * .doc, * .rtf. Файл повинен бути підготовлений за допомоги текстового редактора Microsoft Word.

Використовувані стилі: шрифт Times New Roman, 12 пт, міжрядковий інтервал — 1,5. Формат паперу A4, всі береги — 2 см.

Формули набирають у редакторах формул Microsoft Equation Editor 3.0. чи MathType 6 Опції редактора формул — (10,5; 8,5; 7,5; 14; 10). **Ширина формул — до 12 см.**

Рисунки повинні бути якісними, створені вбудованим редактором рисунків Word Picture або іншими Windows-застосунками (рисунки надають окремими файлами відповідних форматів). **Ширина рисунків — до 12 см.**

Таблиці виконують стандартним вбудованим у Word інструментарієм «Таблиця». **Ширина таблиці — до 12 см.**

Передплату на журнал (друкована версія) в Україні здійснюють:

- за «Каталогом видань України», індекс передплати друкованої версії — 86598;
- за допомоги передплатної агенції «Укрінформнаука» НАН України, ukrinformnauka@gmail.com, індекс журналу — 10029.