

# Кибернетика 1 (191)/2017 и вычислительная техника

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

## СОДЕРЖАНИЕ

### Информатика и информационные технологии

И.В. СУРОВЦЕВ, С.К. ГАЛИМОВ, А.Э. ТАТАРИНОВ Информационная технология определения концентрации токсических элементов в объектах окружающей среды .....	5
V.M. KYUKO Maximum Matching in Weighted Bipartite Graphs (В.М. КИЙКО Нахождение наибольшего паросочетания на взвешенном двудольном графе) .....	32

### Интеллектуальное управление и системы

В.И. ГРИЦЕНКО, А.Е. ВОЛКОВ, Н.Н. КОМАР, Ю.П. БОГАЧУК Интеллектуализация современных систем автоматического управления беспилотными летательными аппаратами .....	45
--	----

### Медицинская и биологическая кибернетика

M.V. BACHYNSKYI, B.I. YAVORSKYI Informational Aspects of the Haptic Stimulation by the Light for Correction of the Human' State (М.В. БАЧИНСКИЙ, Б.И. ЯВОРСКИЙ Информационные аспекты гаптического стимулирования светом для коррекции состояния человека) .....	60
И.В. КАПЛИН, М.Л. КОЧИНА, А.Г. ФИРСОВ Концепция телемедицинской системы для экспресс-оценки уровня внутриглазного давления.....	76

Вниманию авторов .....	95
------------------------	----

# Cybernetics and Computer Engineering

1 (191)/2017

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

## CONTENTS

### Informatics and Information Technologies

I.V. SUROVTSEV, S.K. GALIMOV, O.E. TATARINOV Information Technology for Determining the Concentration of Toxic Elements in Environmental Objects .....	5
V.M. KYIKO Maximum Matching in Weighted Bipartite Graphs .....	32

### Intelligent Control and Systems

V.I. GRITSENKO, O.Ye. VOLKOV, M.M. KOMAR, Yu.P. BOGACHUK Intellectualization of Modern Systems of Automatic Control of Unmanned Aerial Vehicles .....	45
---	----

### Medical and Biological Cybernetics

M.V. BACHYNSKYI, B.I. YAVORSKYI Informational Aspects of the Haptic Stimulation by the Light for Correction of the Human' State .....	60
I.V. KAPLIN, M.L. KOCHINA, A.G. FIRSOV The Conception of Telemedicine System for Express Estimation of Intraocular Pressure's Level .....	76

To Attention of Authors .....	95
-------------------------------	----

# Кібернетика 1 (191)/2017 та обчислювальна техніка

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

## ЗМІСТ

### Інформатика та інформаційні технології

I.B. СУРОВЦЕВ, С.К. ГАЛІМОВ, О.Е. ТАТАРІНОВ Інформаційна технологія визначення концентрації токсичних елементів в об'єктах навколишнього середовища .....	5
V.M. KYUKO Maximum Matching in Weighted Bipartite Graphs (В.М. КИЙКО Знаходження найбільшого паросполучення на зваженому дводольному графові) .....	32

### Інтелектуальне керування та системи

V.I. GRICENKO, O.E. VOLKOV, M.M. KOMAR, YU.P. BOGACHUK Інтелектуалізація сучасних систем автоматичного керування безпілотними літальними апаратами .....	45
--	----

### Медична та біологічна кібернетика

M.V. BACHYNSKYI, B.I. YAVORSKYI Informational Aspects of the Haptic Stimulation by the Light for Correction of the Human' State (М.В. БАЧИНСЬКИЙ, Б.І. ЯВОРСЬКИЙ Інформаційні аспекти гаптичного стимулювання світлом для корегування стану людини) .....	60
I.B. KAPLIN, M.L. KOCHINA, A.G. FIRSOV Концепція телемедичної системи для експрес-оцінювання рівня внутрішньоочного тиску .....	76
До уваги авторів .....	95



DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt191.01.005>

УДК 004.67: 004.023

**І.В. СУРОВЦЕВ**, д-р техн. наук,  
в.о. зав. відд. екологічних цифрових систем  
e-mail: dep175@irtc.org.ua , igorsur52@gmail.com

**С.К. ГАЛІМОВ**, аспірант  
відд. екологічних цифрових систем  
e-mail: dep175@irtc.org.ua

**О.Е. ТАТАРІНОВ**, наук. співроб.  
відд. екологічних цифрових систем  
e-mail: dep175@irtc.org.ua  
Міжнародний науково-навчальний центр  
інформаційних технологій та систем НАН України та МОН України,  
пр. Акад. Глушкова, 40, 03187, м. Київ, Україна

## ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ТОКСИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ В ОБ'ЄКТАХ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

---

*Розглянуто нову інформаційну технологію, яка дозволяє збільшити чутливість та достовірність визначення концентрації токсичних елементів методами імпульсної інверсійної хронопотенціометрії. Для класу монотонно зростаючих сигналів, які є інтегральною сумою процесів багатокомпонентного вимірювання, запропоновано перетворення системи координат, що дає змогу аналізувати сигнал як суму компонентів та суттєво скоротити вхідні дані без втрати корисної інформації. Розроблено цифрові методи відновлення корисного сигналу та генеративна модель багатокомпонентного сигналу, що підвищує ефективність оброблення даних.*

*Створено високочутливу аналітичну систему «Аналізатор ІХП», яка визначає масову концентрацію 14-ти токсичних елементів (ртуть, арсен, свинець, кадмій, цинк, мідь, олово, нікель, кобальт, залізо, марганець, селен, йод, хром) з чутливістю до  $0,05 \text{ мкг/дм}^3$ , шість хімічних елементів та сполук (калій, натрій, кальцій, фтор, амоній, нітрати) з концентрацією до  $6 \cdot 10^7 \text{ мкг/дм}^3$ . Розроблені інструментальні засоби дали можливість створити нові ефективні інформаційні технології оброблення сигналів іншої фізичної природи, що монотонно зростають або зменшуються.*

**Ключові слова:** перетворення структури даних, імпульсна хронопотенціометрія, моделювання, цифрове оброблення, інформаційна технологія.

© І.В. СУРОВЦЕВ, С.К. ГАЛІМОВ, О.Е. ТАТАРІНОВ, 2018

ISSN 2519-2205 (Online), ISSN 0454-9910 (Print). Киб. и выч. техн. 2018. № 1 (191)

## **ВСТУП**

Інтенсивний розвиток промисловості, зростання сільськогосподарського виробництва та відсутність екологічно чистих технологій призводять до поступового забруднення біосфери важкими металами та токсичними хімічними елементами. Активізація антропогенного впливу на людину та навколишнє середовище токсикантів потребує виконання постійного контролю якості питної води, харчових продуктів, оцінювання екологічного стану рослин, ґрунту та інших об'єктів. Одним із факторів екологічної безпеки є визначення в цих об'єктах концентрацій токсичних елементів (ртуті, арсену, свинцю, кадмію тощо), які законодавчо нормуються для кожного об'єкту у вигляді гранично допустимих концентрацій.

Низька чутливість наявних систем вимірювання концентрацій спонукає до створення нових високочутливих методів дослідження та ефективних інформаційних технологій (ІТ). Однією з актуальних залишається проблема удосконалення цифрових методів аналізу даних, що зумовлено необхідністю оброблення слабких аналітичних сигналів під час вимірювання слідових концентрацій токсичних елементів.

Концентрацію елементів визначають різними фізико-хімічними методами дослідження. Найчутливішими є вольтамперометричні та хронопотенціометричні електрохімічні методи аналізу, які дозволяють вимірювати слідові концентрації токсичних елементів. Порівняно з вольтамперометричним аналізом [1, 2], використання методів інверсійної хронопотенціометрії (ІХП) дозволяє значно спростити технічну реалізацію приладів, збільшити чутливість, повторюваність та надійність вимірювання. У теоретичному обґрунтуванні методу ІХП брали участь такі вчені, як Скобець Є.М., Гриневич В.В., Захаров М.С., Баканов В.І., Пньов В.В. [3, 4]. Значний вклад у поширення хронопотенціометричного методу внесли дослідники Карнаухов О.І., Йосипчук Б.В., Галімова В.М., Манк В.В., Копілевич В.А. та інші [5–14].

Прилади, які серійно випускаються в Україні, ґрунтуються на методі ІХП і можуть визначати масову концентрацію п'яти важких металів (свинець, кадмій, цинк, мідь, олово) з чутливістю 1 мкг/дм<sup>3</sup>. Але на практиці, згідно з нормованими вимогами до показників токсичності питної води та харчових продуктів, необхідно визначати масову концентрацію на межі визначення до 0,1–0,05 мкг/дм<sup>3</sup> та мати можливість вимірювати інші хімічні елементи та сполуки (ртуть, арсен, селен, йод, натрій, калій, нітрати).

Одним зі шляхів усунення протиріччя між потребами та вказаними недоліками є створення нової ІТ для визначення концентрацій хімічних елементів в об'єктах навколишнього середовища на базі застосування нових імпульсних та іонометричних методів хронопотенціометрії. Така ІТ має складатися з інформаційного та технічного забезпечення, методів цифрового оброблення, моделювання слабких сигналів складної форми, методик вимірювання концентрацій хімічних елементів у різних об'єктах, що дозволить підвищити чутливість та розширити функціональні можливості приладу.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Принцип роботи методу інверсійної хронопотенціометрії полягає в електрохімічному концентруванні на індикаторному електроді іонів хімічних елементів з розчину проби та наступному вимірюванні їх потенціалів електролітичного розчинення ( $e_i$ ) у часі ( $\tau_i$ ). Аналітичною характеристикою методу є час інверсії елемента, який за стандартизованих умов концентрування та інверсії прямо пропорційний концентрації іонів у розчині. Якісна характеристика — потенціал піку і діапазон зміни потенціалів інверсії елементу.

Традиційні підходи до оброблення аналітичних сигналів  $e(\tau)$  в хронопотенціометрії, запропоновані Захаровим М.С. [4], Плэмбеком Дж.А. [15], Sparks Donald L. [16], Britz D. [17] та іншими, передбачають аналіз даних у координатах ( $\tau, e$ ) або ( $\tau, de/d\tau$ ), що не дозволяє підвищити чутливість до необхідного рівня та вирішити проблему ідентифікації елемента у багатокомпонентному сигналі, коли компоненти інверсії взаємно перекриваються. Це довгий час було основною причиною, що стримувало практичне застосування методу ІХП.

Дослідження показали, що сигнал інверсії  $e(\tau)$  перед виконанням цифрового аналізу необхідно попередньо подати у іншому вигляді. Для цього треба виконати редукцію структури даних [18–19], тобто таке перетворення системи координат, яке дозволить розглядати інтегральний сигнал у вигляді суми окремих компонентів вимірювання. Найбільш дієвим є аналіз сигналів інверсії  $e(\tau)$  у координатах ( $e, dt/de$ ), в яких одержані дані нагадують значення відомих хімічних методів (інверсійної вольтамперометрії, хроматографії та мас-спектрального аналізу) [5, 8].

Під час цифрового оброблення аналітичних сигналів  $e_{\text{вх}}(\tau)$  вважають, що корисний сигнал  $e(\tau)$  спотворено адитивною випадковою завадою  $\xi$ , яка має яскраво виражений високочастотний характер:  $e_{\text{вх}}(\tau) = e(\tau) + \xi$ . Сигнал інверсії  $e(\tau)$ , який монотонно зростає, є інтегральною сумою вимірювань окремих хімічних елементів. Процес інверсії кожного елемента виконується послідовно, у власному діапазоні потенціалів, відповідно до зростання значення стандартного електродного потенціалу в ряді активності металів. Реальні значення потенціалів піку та діапазонів інверсії елемента залежать від концентрації іонів, хімічного складу електролітичного фоновому розчину, матеріалу, з якого виготовлено індикаторний електрод, та умов перекриття компонентів у багатокомпонентному сигналі.

Для відновлення корисного сигналу за умов дії високочастотних завад традиційні методи фільтрації та згладжування [20] не завжди підходять для аналізу даних вимірювання, бо спотворюють монотонно зростаючий сигнал та порушують його інтегральні характеристики, що призводить до «розмивання» форми, значних похибок визначення часу інверсії та концентрацій елементу.

На сьогодні доволі складною та не вирішеною проблемою є побудова загальної моделі багатокомпонентного сигналу за моделями окремих компонентів з багатьма невідомими параметрами [21–24].

Тому потрібно провести дослідження, спрямовані на розв'язання завдань підвищення ефективності методів відновлення корисного сигналу.

**Мета роботи** — створення ІТ вимірювання концентрацій методами хронопотенціометрії, яка дозволить суттєво збільшити чутливість та надійність визначення концентрацій хімічних елементів у рідких пробах різних об'єктів біосфери.

## ПЕРЕТВОРЕННЯ СТРУКТУРИ ДАНИХ АНАЛІТИЧНОГО СИГНАЛУ ІНВЕРСІЇ

Для спрощення аналізу багатокомпонентного сигналу інверсії запропоновано перетворення системи координат [25], яке дає змогу розглянути інтегральний сигнал  $e(\tau)$  у вигляді суми окремих компонентів вимірювання хімічних елементів:

$$(\tau, e) \rightarrow (f, T) \rightarrow (f, dT/df), \quad (1)$$

де  $e(\tau)$  — аналітичний сигнал інверсії з постійним кроком  $\Delta\tau_{\text{АЦП}}$  за часом  $\tau$ ;  $T(f)$  — перетворений сигнал ( $f \in e, T \in \tau$ ) з постійним кроком  $\Delta f$  за потенціалом  $f$ ;  $t(f) = dT/df$  — сигнал інтенсивності.

Перетворення виконується у такій послідовності:

1. Відновлення корисного монотонно зростаючого сигналу  $e(\tau_k)$  з аналітичного сигналу інверсії  $e_{\text{вх}}(\tau)$ , спотвореного високочастотним шумом:

$$e(\tau_k) \leq e(\tau_{k+1}), \tau_k = k \cdot \Delta\tau_{\text{АЦП}}, k = 1, \dots, N_E, \quad (2)$$

де  $N_E$  — довжина сигналу  $e_{\text{вх}}(\tau)$ ;  $\Delta\tau_{\text{АЦП}}$  — дискретність квантування аналітичного сигналу у часі.

2. Формування перетвореного сигналу інверсії  $T(f)$  (зміна системи координат):

$$e(\tau_{k-1}) \leq f_j < e(\tau_k), f_j = j \cdot \Delta f, j = 1, \dots, N_T, \quad (3)$$

де  $N_T$  — довжина сигналу  $T(f_j)$ ;  $\Delta f$  — дискретність потенціалу  $f_j$  сигналу  $T(f_j)$ ,  $A$  — лінійний оператор перетворення.

У разі виконання лінійної інтерполяції в інтервалі  $(\tau_{k-1}, \tau_k)$  оператор  $A$  має такий вигляд:

$$T_j = A(f_j, \tau_{k-1}, e_{k-1}, \tau_k, e_k) = \frac{\tau_k - \tau_{k-1}}{e_k - e_{k-1}} (f_j - e_{k-1}) + \tau_{k-1}. \quad (4)$$

У прикладних ІТ інтерполяція виконується кубічними сплайнами.

3. Диференціювання перетвореного сигналу інверсії  $T(f)$  у сигнал інтенсивності  $t(f) = dT(f)/df$ :

$$t(f_i) = (T_i - T_{i-1}) / \Delta f; \quad i = 1, \dots, N, \quad N = N_T - 1, \quad (5)$$

де  $N$  — довжина сигналу  $t(f_i)$ .

Перетворення систем координат є взаємно однозначним, що дає змогу повністю відновити корисний сигнал інверсії  $e(\tau)$  через зворотне перетворення  $t(f)$ :

$$T_j = T_{j-1} + t(f_j) \cdot \Delta f; \quad e_k = A(\tau_k) = A(\tau_k, f_{j-1}, T_{j-1}, f_j, T_j). \quad (6)$$

Довжина вибірки  $N$  сигналу інтенсивності  $t(f)$  не залежить від реальної довжини  $N_E$  аналітичного сигналу  $e(\tau)$ , величина коефіцієнту стиснення даних  $K = N_E / N$  може сягати значення більше 500-от, що дає змогу зберігати у базі даних усі сигнали вимірювання без втрати корисної інформації.

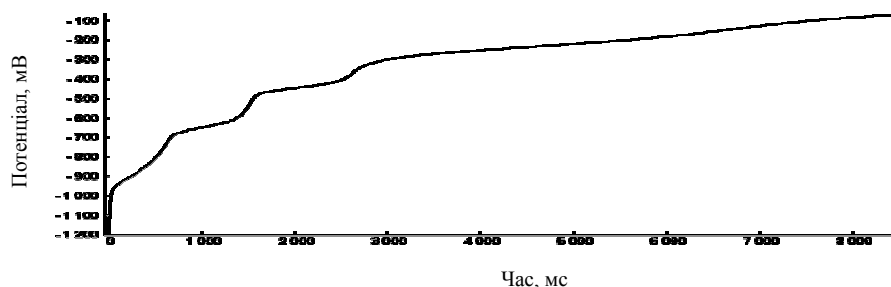


Загальна послідовність виконання перетворення системи координат та цифрового оброблення сигналу має вигляд:

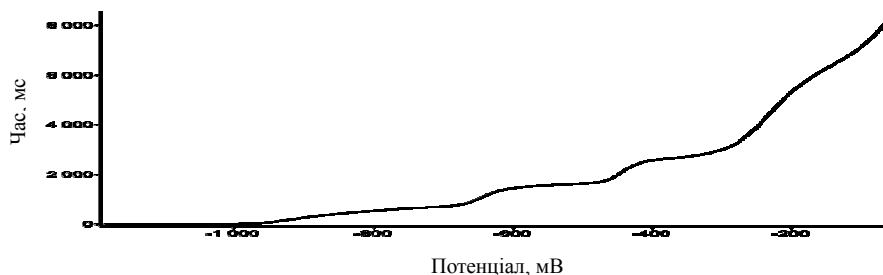
*Сигнал інверсії* → *Цифрова фільтрація* → *Формування перетвореного сигналу* → *Диференціювання* → *Згладжування* → *Сигнал інтенсивності*.

Розглянемо приклад застосування перетворення системи координат для сигналу багатокомпонентної інверсії вимірювання елементів (цинк, кадмій, свинець, мідь), який зображено на рис. 1.

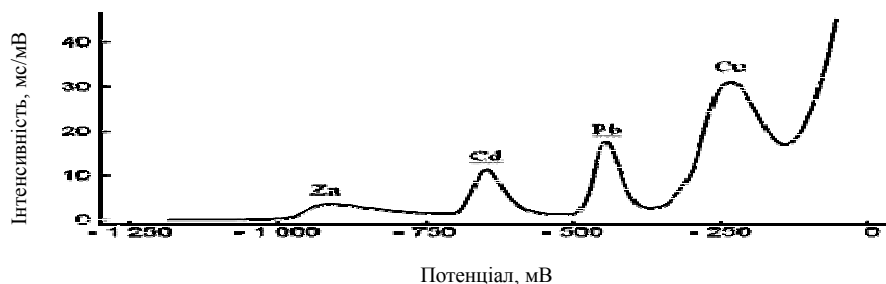
У даному випадку інтегральна сума вимірювань багатокомпонентного процесу інверсії  $e(\tau)$  перетворилась у суму компонентів сигналу інтенсивності  $t(f)$ , в якій кожний хімічний елемент ідентифікується окремим компонентом із потенціалом піку (точка максимуму) та діапазоном вимірювання (дві точки мінімуму).



а) корисний сигнал інверсії  $e(\tau)$



б) перетворений сигнал  $T(f)$



в) сигнал інтенсивності  $t(f)$

**Рис. 1.** Перетворення структури даних сигналу інверсії

Перейдемо до відновлення корисного сигналу  $e(\tau)$  методами цифрового оброблення даних.

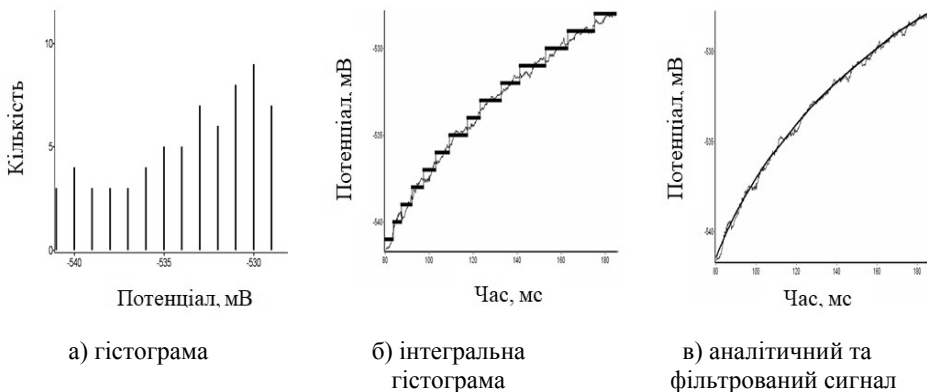
**Цифрова фільтрація.** Аналіз характерних видів аналітичних сигналів інверсії показав [26], що неможливо вибрати якийсь один наявний метод цифрової фільтрації для попереднього оброблення всіх видів сигналів. Процес відновлення корисних даних слід проводити шляхом послідовного застосування нових інструментальних засобів, які мають ітераційний характер та виконуються в залежності від виду сигналу.

Запропоновано новий **метод гістограмної фільтрації** даних монотонно зростаючого сигналу [28] для видалення адитивних високочастотних завад у режимі реального часу [27]. Суть методу полягає у тому, що під час зчитування аналітичного сигналу квантують потенціали за рівнем та підраховують кількість спостережень у кожному заданому інтервалі, формуючи гістограму розподілу потенціалів (рис. 2а). Після повного зчитування сигналу визначають тривалість дії потенціалу (кількість  $\cdot \Delta t_{\text{АЦП}}$ ), координати часу та середні амплітуди інтервалу (рис. 2б). Фільтрований сигнал розраховують способом інтерполяції середніх координат інтервалів для всіх  $N_E$  точок корисного сигналу (рис. 2в).

Одержана гістограма (рис. 2а) після визначення тривалості дії потенціалів фактично є дискретним сигналом інтенсивності  $t(f)$ , тобто, в процесі квантування автоматично виконується перетворення структури даних.

Перевагою методу є можливість роботи у реальному масштабі часу, відсутність операцій з плаваючою точкою та фіксований обсяг необхідної оперативної пам'яті, який не залежить від тривалості сигналу. В ІТ цей метод є допоміжним інструментальним засобом у способі усунення випадкових імпульсних завад та викидів.

Традиційні методи виявлення імпульсних завад та викидів (наприклад, медіанний метод) не завжди визначають тривалі у часі викиди, пов'язані з роботою імпульсних джерел напруги. Для вирішення цієї проблеми запропоновано новий **спосіб усунення випадкових імпульсних завад та викидів**, який використовує статистичні характеристики порівняння аналітичного  $e(\tau)$  та фільтрованого сигналів  $e_{\text{ф}}(\tau)$ .



**Рис. 2.** Метод гістограмної фільтрації

Корекцію аналітичного сигналу в ітераційному режимі здійснюють за таким алгоритмом.

1. Виконуємо метод гістограмної фільтрації.
2. Ділимо сигнал на  $r$  рівних інтервалів, в яких підраховуємо величини середньоквадратичних відхилень  $S_{er}$  між аналітичним та фільтрованим сигналом.

3. За значеннями  $S_{er}$  в інтервалах визначаємо лінійну залежність:

$$S_e(\tau) = a + b \cdot \tau.$$

4. В аналітичному сигналі  $e(\tau_k)$  замінюємо амплітуди на значення  $e_\phi(\tau_k)$  доти, доки у точці  $k$  виконується умова:

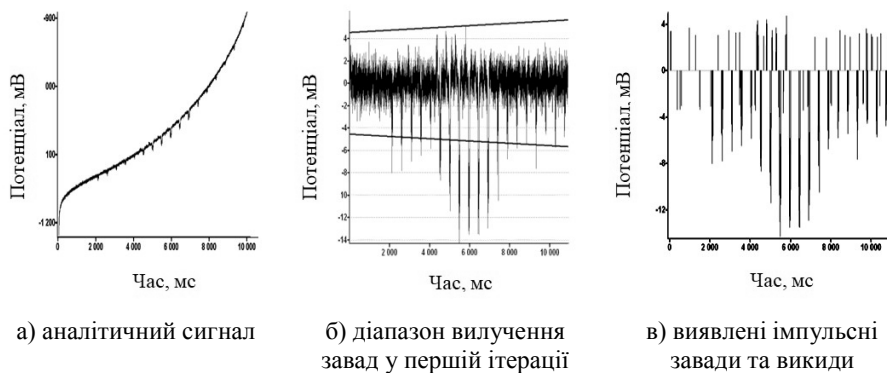
$$|e(\tau_k) - e_\phi(\tau_k)| > 3 \cdot S_e(\tau_k). \quad (7)$$

Наведений приклад (рис. 3) підтверджує ефективність запропонованого способу.

Після очищення даних від імпульсних завад та викидів виконуємо відновлення корисного сигналу, спотвореного високочастотним шумом вимірювання.

Дослідження показали, що для монотонно зростаючих слабких сигналів інверсії застосування класичних методів та гістограмної цифрової фільтрації не завжди ефективно, бо призводить до порушення форми та інтегральних характеристик у місцях різкої зміни кривизни сигналу, що впливає на точність визначення часу інверсії та концентрації. Описаний метод гістограмної фільтрації використовують переважно в автономних аналізаторах та в інших технічних приладах для відновлення коротких за часом сигналів. У випадку фільтрації довготривалих сигналів та в аналітичних вимірюваннях застосовують метод частотно-часової фільтрації, який розглянемо більш детально.

Для відновлення корисного сигналу  $e(\tau)$ , спотвореного високочастотними завадами, скористаємося внутрішніми математичними характеристиками: точками екстремуму  $e'(\tau) = 0$ , перегину  $e''(\tau) = 0$  та інтервалами часу між ними, які достатньо повно відображають характер слабких змін у сигналі. Згідно способу визначення спектру аналогового сигналу [29], застосування точок екстремуму дозволяє виконати швидкий спектральний аналіз та вирішити інші технічні проблеми [30, 31].



**Рис. 3.** Виявлення випадкових імпульсних завад та викидів

Такий підхід до цифрового оброблення сигналів став основою створення нового **методу частотно-часової фільтрації** [26], який відзначається швидкістю та ефективністю відновлення корисного сигналу інверсії та виконується за таким алгоритмом.

Знаходимо точки екстремумів високочастотних завад в аналітичному сигналі, які відповідають умові

$$(e_i - e_{i-1}) \cdot (e_{i+1} - e_i) < 0; (\tau_k, e_k) = (\tau_i, e_i); i = 2, \dots, N_E - 1, \quad (8)$$

де  $e_i$  — поточна амплітуда  $i$  точки сигналу  $e(\tau_i)$  після усунення випадкових імпульсних завад та викидів в аналітичному сигналі  $e_{\text{вх}}(\tau)$ ;  $(\tau_k, e_k)$  — координати точки екстремуму;  $N_E$  — довжина аналітичного сигналу  $e_{\text{вх}}(\tau)$ .

Інтервал часу  $\Delta\tau_k \leq \Delta\tau_\phi$  між сусідніми  $k$  та  $k + 1$  екстремумами вказує на наявність у сигналі півхвилі коливання завади з амплітудою  $\Delta e_k$  та частотою  $f_k$ , яка менше заданої частоти фільтру  $f_\phi$  з інтервалом  $\Delta\tau_\phi$ :

$$f_k = \frac{1}{2\Delta\tau_k}, \quad \Delta e_k = \frac{|e_{k+1} - e_k|}{2}, \quad \Delta\tau_k = \tau_{k+1} - \tau_k, \quad \Delta\tau_\phi = \frac{1}{2f_\phi}. \quad (9)$$

Координати точки перегину в аналітичному сигналі  $(\tau_p, e_p)$  визначаємо наступним чином:

$$\tau_p = (\tau_k + \tau_{k+1}) / 2, \quad e_p = (e_k + e_{k+1}) / 2. \quad (10)$$

Метод частотно-часової фільтрації оснований на принципі: якщо вилучити значення аналітичного сигналу між точками перегину  $(\tau_p, e_p)$  та  $(\tau_{p+1}, e_{p+1})$ , то корисний відновлений сигнал за точками перегину дає змогу усунути виявлену заваду.

З іншого боку, якщо знайти у сигналі однакові інтервали часу  $\Delta\tau_k$ , підсумувати та визначити середні значення  $\Delta e_k$ , то, згідно зі способом [29], одержимо оцінку спектральної характеристики сигналу у високочастотному діапазоні спектру.

Відновлення корисного сигналу в ітераційному режимі методом частотно-часової фільтрації здійснюємо в два етапи.

1. Аналізуємо завади з інтервалами часу  $\Delta\tau_k \leq 5\Delta\tau_{\text{АЦП}}$  із застосуванням лінійної інтерполяції між точками перегину (рис. 4).

2. Фільтруємо гармонічні та випадкові завади з інтервалами, що менше частоти фільтру  $f_\phi$ , із застосуванням інтерполяції кубічними сплайнами (рис. 5).

Експерименти на модельних та реальних даних показують, що запропонований метод частотно-часової фільтрації дає змогу ефективно приглушити високочастотні завади.

**Згладжування.** Під час виконання перетворення системи координат після процедури диференціювання одержаний сигнал інтенсивності може мати обмежені за рівнем випадкові завади (рис. 6а), пов'язані з дискретністю цифрових методів фільтрації сигналу, що потребує їх виявлення перед виконанням моделювання.

Відомі цифрові методи згладжування не завжди дають змогу коректно обробляти диференційні сигнали, оскільки з'являється проблема спотворення форми корисного сигналу у місцях різкої зміни кривизни (виділено колом, рис. 6а), особливо його інтегральних характеристик після відновлення, що неможливо відкоригувати за значеннями інтегрального сигналу  $T(f)$ . На рисунках 6б та 6в показано у збільшеному масштабі види спотворення форми сигналу.

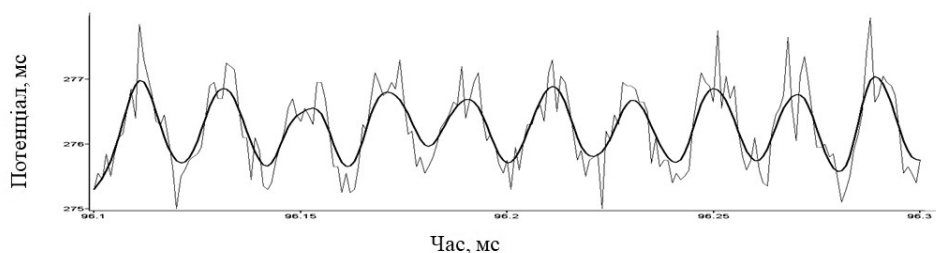


Рис. 4. Аналітичний та фільтрований сигнал після першого етапу

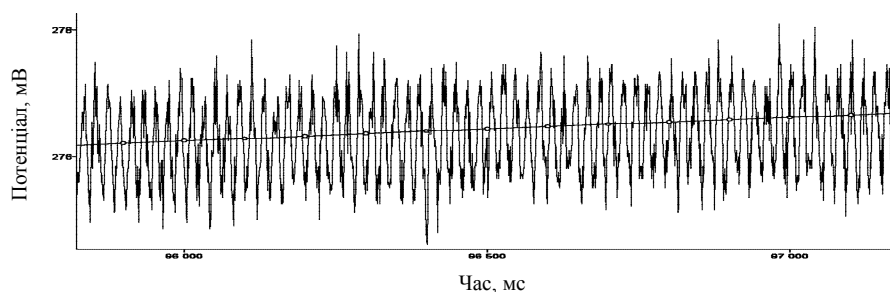


Рис. 5. Сигнал інверсії після частотно-часової фільтрації

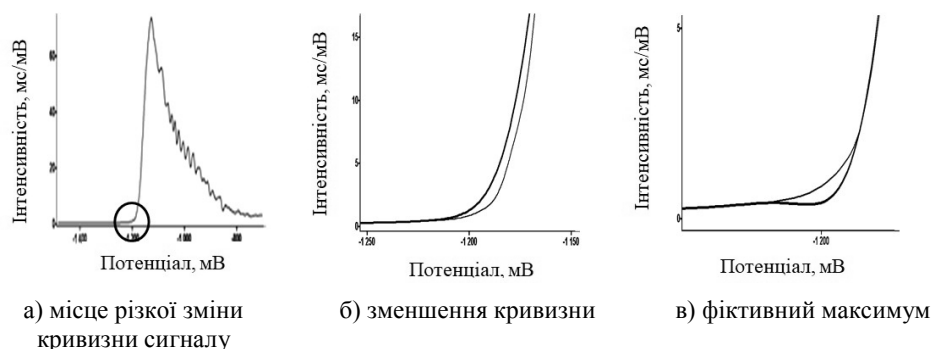


Рис. 6. Спотворення форми сигналу інтенсивності відомими методами згладжування

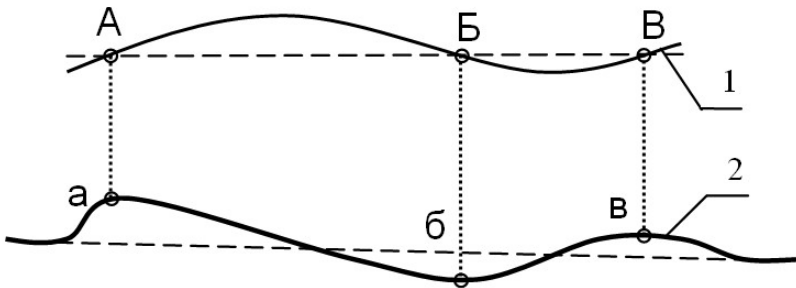
Застосування методів згладжування (змінного середнього, експоненціального, поліномів або сплайнів) призводить до зменшення кривизни та відповідного збільшення часу інверсії (рис. 6б), а використання рекурсивних фільтрів — до появи фіктивних точок максимуму (рис. 6в).

Для недопущення спотворення форми під час відновлення корисного сигналу інтенсивності розроблено новий **метод адаптивного згладжування даних** [32], що застосовує та розширює принцип описаного методу частотно-часової фільтрації, а саме, якщо виконати згладжування точок інтегрального сигналу  $T(f)$  за точками перегину, які відповідають точкам екстремумів сигналу інтенсивності, то після зворотного диференціювання сигнал інтенсивності  $t(f) = T'(f)$  буде гладким, але водночас не порушиться його форма та інтегральні характеристики.

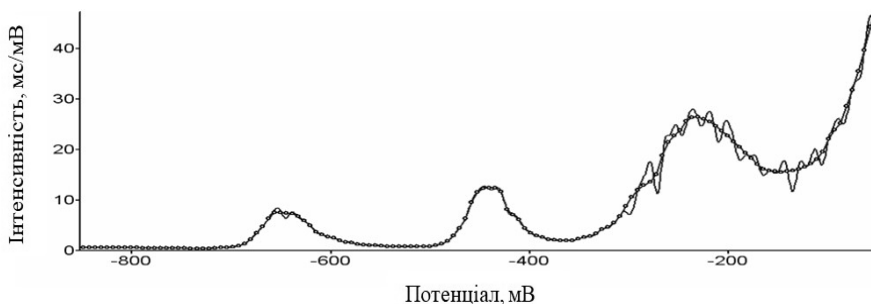
Схема методу адаптивного згладжування, що демонструє відповідність точок екстремумів сигналу інтенсивності точкам перегину інтегрального сигналу, показана на рис. 7.

Згідно зі схемою, абсциси точок екстремумів сигналу інтенсивності  $t'(f) = 0$  (а, б, в) відповідають абсцисам точок перегину інтегрального сигналу  $T''(f) = 0$  (А, Б, В), а інтервали між ними співпадають. Якщо у сигналі інтенсивності 2 знайдено інтервал між точками екстремумів  $\Delta f$ , який менше граничного інтервалу фільтру  $\Delta f_{\text{ф}}$ , то під час згладжування інтегрального сигналу 1 по точках (А, Б, В) будуть усунені завади (а, б, в) у корисному сигналі.

Аналіз результатів проведених експериментів адаптивного згладжування еталонних моделей (пилоподібного сигналу, складного меандру та інших, які були попередньо зашумлені високочастотною завадою) показав, що цей метод відновлення корисного сигналу є ефективним і його можна застосувати для згладжування сигналів інтенсивності. Приклад використання методу для відновлення сигналу інтенсивності наведено на рис. 8–10.



**Рис. 7.** Схема методу адаптивного згладжування: 1 — інтегральний сигнал  $T(f)$ ; 2 — сигнал інтенсивності  $t(f)$ ; а, б, в — точки екстремумів сигналу інтенсивності  $t'(f) = 0$ ; А, Б, В — точки перегину інтегрального сигналу  $T''(f) = 0$



**Рис. 8.** Вхідний та згладжений сигнал інтенсивності після першої ітерації

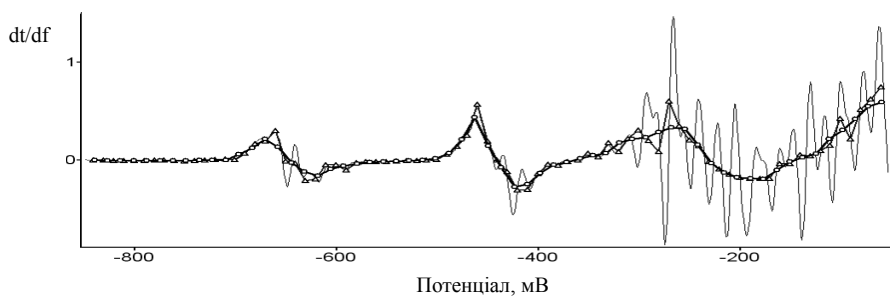


Рис. 9. Перша похідна сигналу інтенсивності після згладжування

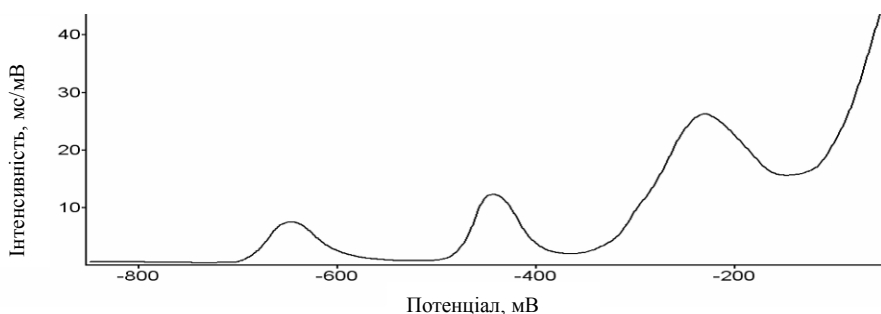


Рис. 10. Згладжений сигнал інтенсивності

Результати експериментів на модельних та реальних даних підтверджують якість виконання адаптивного згладжування. Одержаний сигнал інтенсивності (рис. 10) може бути використано для моделювання та визначення характеристик компонентів.

## МОДЕЛЮВАННЯ КОМПОНЕНТІВ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ІНВЕРСІЇ

Аналіз можливих шляхів моделювання багатокомпонентних сигналів інверсії показав, що під час оброблення реальних аналітичних сигналів бажано подавати структуру моделей у вигляді простих, попередньо означених залежностей, в яких визначення параметрів моделей зводиться до задач параметричної ідентифікації. Особливо це відноситься до задач визначення концентрацій елементів за способом багаторазових добавок. У роботах Захарова М.С. [4], Плэмбека Дж.А. [15], Britz D. [17] та інших зауважується, що для виконання аналізу фону, проби та проби з добавками під час вимірювання концентрації повинні використовуватися ідентичні методи оброблення даних, які не допускають зміни структури опису компонентів у цих сигналах.

На основі теоретичних засад методу ІХП можна стверджувати, що аналітичний сигнал та, відповідно, сигнал інтенсивності  $t(f)$  є сумою двох незалежних у часі процесів: ємнісного фоновому розряду електродів (базова лінія або нижня обвідна сигналу інтенсивності) та інверсії окремих хімічних елементів (спектр компонентів, за яким визначають концентрації елементів). Такий самий підхід застосовують під час оброблення сигналів

методами вольтамперометрії, рідинної хроматографії та мас-спектрального аналізу: спочатку виявляють сигнал фонового вимірювання (базову лінію), а потім одержаний спектр компонентів застосовують для визначення концентрацій елементів [16, 17, 33].

Безпосередня побудова загальної математичної моделі сигналу інтенсивності за моделями окремих компонентів та базової лінії з багатьма невідомими параметрами є доволі складною проблемою, тому побудуємо **генеративну модель багатокомпонентного сигналу**, що дозволить спростити цей процес.

**Моделювання компонентів.** Припустимо, що базову лінію та кожну незалежну модель  $j$  компонента можна подати у вигляді добутку параметра висоти  $H_j$  та нормованої моделі  $g_j(f_i)$  з визначеними за сигналом інтенсивності  $t(f_i)$  незмінними іншими параметрами [33].

За таких припущень загальна модель сигналу інтенсивності для  $m$  компонентів спектра з невеликим взаємним накладенням має вигляд:

$$t(f_i) = \sum_{j=0}^m H_j g_j(f_i). \quad (11)$$

Модель компонента  $g_0(f_i)$ , що описує базову лінію сигналу інтенсивності  $t(f)$ , згідно теоретичних міркувань доцільно подати в експоненціальній залежності:

$$g_0(f_i) = \exp\left(\sum_{p=0}^4 b_p \cdot f_i^p\right). \quad (12)$$

Невідомі коефіцієнти вектору  $B$  визначають методом найменших квадратів за множиною вибраних точок, що характеризують побудову кусково-лінійної нижньої обвідної у логарифмічних координатах.

Під час визначення концентрації елемента виконують один або декілька паралельних вимірювань розчинів: фону, проби та добавки. Для кожного отриманого сигналу інтенсивності визначають модель нижньої обвідної  $g_0(f_i)$  та одержують спектр компонентів  $\Psi(f_i) = t(f_i) - g_0(f_i)$ . Приклад визначення спектру компонентів для сигналів інтенсивності приведено на рис. 11.

Численні експерименти [34–37] показують, що правомірно моделювати компоненти у вигляді несиметричних функцій нормального розподілу аналогічно підходам до моделювання у хроматографії та мас-спектрометрії:

$$H \cdot \text{ERF}(f, f_0, \sigma) = H \cdot \exp\left[-\frac{(f - f_0)^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (13)$$

Модель окремого компонента  $H_j \cdot g_j(f_i)$  з дисперсіями  $\sigma_1, \sigma_2$  та потенціалом піку  $f_0$  має вигляд:

$$H_j \cdot g_m(f) = \begin{cases} H_j \cdot \text{ERF}(f, f_0, \sigma_1), & f \leq f_0 \\ H_j \cdot \text{ERF}(f, f_0, \sigma_2), & f > f_0 \end{cases}. \quad (14)$$



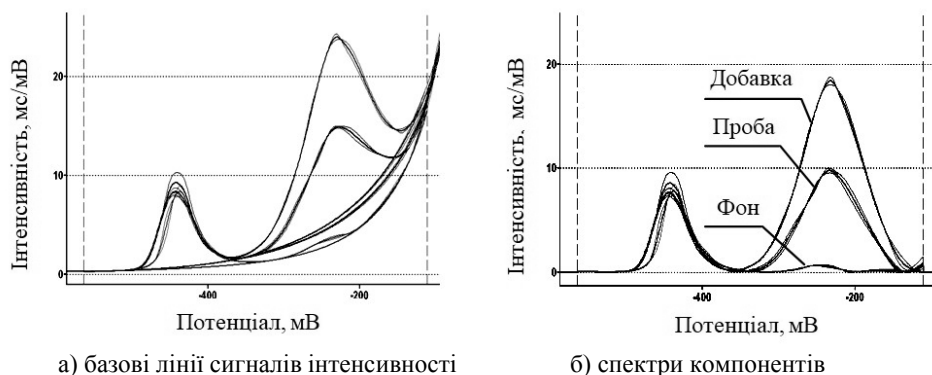


Рис. 11. Побудова спектру компонентів сигналів інтенсивності

Параметри  $j$  моделі  $H_j$  та  $f_{0j}$  визначаємо в такій послідовності.

1. Знаходимо номер дискретної точки максимуму ( $i_{max}$ )  $j$ -го компонента у діапазоні його вимірювання  $[f_{1j}, f_{2j}]$  за (8).
2. Вибираємо множину точок  $S_j(f) \subset t(f)$  компонента з номерами точок  $[i_{max} - 6, i_{max} + 6]$ .
3. Розраховуємо значення похідної  $t'(f)$  для точок  $S_j(f)$  у діапазоні  $[i_{max} - 3, i_{max} + 3]$  з використанням залежності, заснованої на диференціюванні інтерполяційного поліному Лагранжа, яка для числа вузлів  $n = 7$  та для одиничного кроку сітки дискретного сигналу має вигляд [20]:

$$t'_i = (t_{i+3} - 9t_{i+2} + 45t_{i+1} - 45t_{i-1} + 9t_{i-2} - t_{i-3}) / 60, \quad (15)$$

водночас точність оцінки (15) характеризується похибкою  $R = 1/140 \cdot t^{(7)}$ .

4. Шляхом використання зворотної інтерполяції за вибраними точками  $t'(f)$  визначаємо дійсне значення координати  $f_0$  за умови  $t'(f_i) = 0$ , що відповідає точці максимуму.

5. Розраховуємо точне значення  $H$  інтегруванням  $t'(f)$  від точки з номером  $i_{max}$  до координати  $f_0$ .

Для визначення параметрів моделі  $\sigma_1, \sigma_2$  вибираємо множину точок сигналу спектра  $s_j(f_i) \subset t(f_i)$  у діапазоні  $[f_{1j}, f_{2j}]$ , яка достатня для побудови моделі (окремо для лівої та правої частини несиметричного розподілу). Логарифмуємо гаусову функцію (13) та аналізуємо її як поліном другого ступеня:

$$\ln(s_j(f_i)) = \left[ \ln(H) - \frac{f_0^2}{2\sigma^2} \right] + \left[ \frac{f_0}{\sigma^2} \right] \cdot f_i + \left[ -\frac{1}{2\sigma^2} \right] \cdot f_i^2 = A + B \cdot f_i + C \cdot f_i^2. \quad (16)$$

Застосовуючи координати сигналу  $s_j(f_i)$ , визначаємо за допомоги методу найменших квадратів коефіцієнти параболи  $A, B, C$  та оптимальні значення параметрів  $\sigma_1$  та  $\sigma_2$ :

$$\sigma^2 = \frac{1}{2 \cdot |C|}. \quad (17)$$

Загальну модель сигналу інтенсивності формуємо таким чином.

1. Розраховуємо модель нижньої обвідної  $g_0(f_i)$  та визначаємо спектр компонентів  $\Psi(f_i)$ .
2. У спектрі  $\psi_i = \Psi(f_i)$  знаходимо компонент  $j$  з найбільшою ординацією  $H_j$  та виконуємо для нього моделювання  $H_j \cdot g_j(f_i)$ .
3. Вилучаємо зі спектра  $\Psi(f_i)$  координати моделі компонента, які обмежені інтервалом  $[f_{0j} - 5\sigma_{1j}, f_{0j} + 5\sigma_{2j}]$ .
4. Повторюємо визначення інших компонентів (п. 2 та п. 3).
5. Виявляємо залишковий лівий сигнал  $g_L(f_q)$  та залишковий правий сигнал  $g_R(f_p)$  спектра, поява яких пояснюється тим, що зчитані значення аналітичного сигналу інверсії  $e(\tau)$  є лише частиною повного процесу електрохімічної інверсії. Для цих можливих компонентів спектра процес моделювання не виконується, а у загальній моделі застосовують лише числові значення множини точок  $\{f_q, \psi_q\}$  та  $\{f_p, \psi_p\}$ .

Загальна модель сигналу інтенсивності після визначення усіх компонентів має вигляд:

$$t_H(f_i) = \sum_{j=1}^m H_j g_j(f_i) + H_L g_L(f_i) + H_R g_R(f_i) + H_0 g_0(f_i). \quad (18)$$

Запропонована модель відноситься до класу одномірних регресійних моделей та визначається шляхом вирішення задачі параметричної ідентифікації, в якій структура залежностей  $g_j(f_i)$  відома, а необхідно лише оцінити вектор параметрів  $H$ . Оптимальні значення  $H_{opt}$  вектору параметрів  $H_1, \dots, H_m, H_L, H_R, H_0$  знаходимо за методом найменших квадратів, враховуючи початкові значення:  $H_L = H_R = H_0 = 1$ .

Численні експерименти [33] дозволяють стверджувати, що застосування методу моделювання сигналу інтенсивності за рахунок єдиного підходу до цифрового оброблення сигналів вимірювання дозволяє збільшити точність, повторюваність та достовірність визначення концентрацій хімічних елементів. Крім того, метод моделювання не потребує втручання хіміка-аналітика для вибору діапазону зміни потенціалів компонента, що дає можливість повністю автоматизувати процес вимірювання концентрацій.

**Визначення часу інверсії.** Під час вимірювання концентрацій  $j$  хімічний елемент однозначно ідентифікується компонентом спектра за діапазоном потенціалів  $[f_{1j}, f_{2j}]$  та величиною потенціалу піку (параметр  $f_{0j}$ ). Час інверсії  $t_j$  хімічного елемента визначається за сигналом інтенсивності як площа компонента  $S_j(f) \subset t(f)$ :

$$t_j = \int_{f_{1j}}^{f_{2j}} t(f) df = \sum_{i=f_{1j}}^{f_{2j}} S_j(f_i). \quad (19)$$

Досвід застосування **базового методу ІХП** для визначення концентрацій свідчить, що подальше підвищення чутливості вимірювання та збільшення часу інверсії за цим методом досягнути практично неможливо, тому для вирішення цього завдання запропоновано застосувати відомі принципи імпульсних електрохімічних методів аналізу. Імпульсні методи широко використовуються у вольтамперометрії, теоретичні основи такого підходу описані в роботах Захарова М.С. [4], Плэмбека Дж.А. [15], Каплана Б.Я. [38] та ін.

Основна ідея застосування імпульсних методів у хронопотенціометрії — збільшення часу інверсії за рахунок активного втручання у процес електролітичного окислення [39, 40]. Під час імпульсу відбувається «підзарядка» вимірювального електрода, тобто електрод короткочасно переходить в режим концентрування, що призводить до зменшення електрорушійної сили окислення, сповільнення процесу інверсії та збільшення чутливості вимірювання концентрацій.

Для використання імпульсних процесів інверсії у хронопотенціометрії запропоновано нові електрохімічні методи дослідження, які дозволили суттєво збільшити чутливість вимірювання концентрацій токсичних елементів:

- імпульсна інверсійна хронопотенціометрія (ІХП);
- диференційна імпульсна хронопотенціометрія (ДІХП);
- окислювальна імпульсна хронопотенціометрія (ОІХП).

Загальну схему застосування імпульсного режиму інверсії за постійних значень параметрів імпульсу та періодичності надано на рис. 12.

Принцип *методу імпульсної інверсійної хронопотенціометрії* полягає у тому, що після електрохімічного концентрування під час виконання інверсії на поточний сигнал накладаються прямокутні імпульси з одностороннім приростом амплітуди. Метод дає змогу збільшити чутливість визначення концентрацій елементів до  $0,05 \text{ мкг/дм}^3$ . Найбільший ефект від застосування методу — визначення слідових значень концентрацій токсичних елементів: ртуті, свинцю, кадмію, марганцю [41].

Принцип *методу диференційної імпульсної хронопотенціометрії* відрізняється тим, що під час виконання інверсії на поточний сигнал накладаються прямокутні імпульси з двостороннім приростом амплітуди. Це дає змогу збільшити чутливість до  $0,1 \text{ мкг/дм}^3$  та застосовувати для визначення концентрації елементів із слабкими електрохімічними властивостями: йоду, бром, селену, заліза [42].

Принцип *методу окислювальної імпульсної хронопотенціометрії* полягає в тому, що під час виконання інверсії виконується циклічна «підзарядка» вимірювального електрода за рахунок зміни потенціалів підставки. Метод дає змогу збільшити чутливість визначення концентрацій до  $0,3 \text{ мкг/дм}^3$  та застосовується переважним чином з вимірювальним електродом на золотій основі для аналізу елементів: нікелю, кобальту, арсену [43].

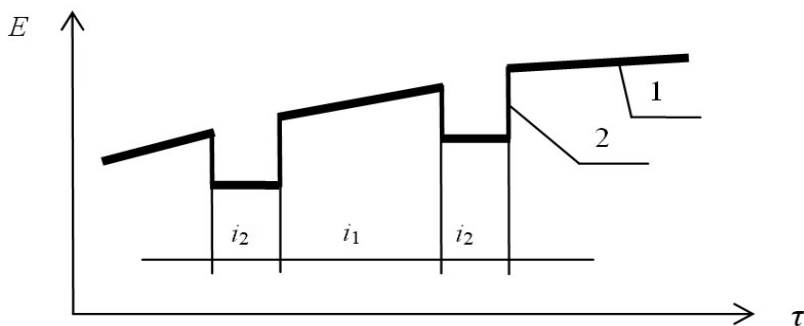


Рис. 12. Загальна схема застосування імпульсного режиму інверсії: 1 — сигнал інверсії, 2 — імпульс,  $i_1$  — тривалість між імпульсами,  $i_2$  — тривалість імпульсу

Розроблено новий **метод хроноіонометрії** (ХІ) для розширення діапазону вимірювання концентрацій хімічних елементів в сторону великих значень із застосуванням іонселективних електродів шляхом використання режиму прямої полярографії на хронопотенціометричному приладі. Цим методом визначають такі хімічні елементи та сполуки як калій, натрій, кальцій, фтор, амоній, нітрати з концентраціями до  $6 \cdot 10^7$  мкг/дм<sup>3</sup> [44]. Суть методу полягає у вимірюванні активності (концентрацій) іонів за допомоги іонселективного електроду та нового хлорсрібного електроду з подвійним електролітичним ключем. Під час роботи іонселективний електрод реагує на певний тип іону, а його потенціал залежить від вмісту іонів у розчині. Лінійна залежність різниці потенціалів електродної системи від активності іонів елементу описується рівнянням Нернста [1, 2, 15]. Значення концентрацій визначають за градуовальним графіком або за удосконаленим способом багаторазових добавок (до п'яти) стандартного розчину іонів елемента [45].

## ВИЗНАЧЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЙ ХІМІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ В ОБ'ЄКТАХ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Загальна послідовність дій під час вимірювання концентрацій хімічних елементів у різних об'єктах навколишнього середовища електрохімічними методами така:

- виконують відбір проби об'єкта навколишнього середовища, фіксуючи масу навіски (тверда проба) або об'єм проби (рідка проба, проба повітря);
- проводять пробопідготовку відібраних зразків у відповідності до нормативних документів;
- послідовно виконують вимірювання концентрацій елементів, використовуючи відповідний фоновий розчин та одержаний розчин проби зразку.

Концентрацію хімічного елемента  $C_{Me}$  визначають за способом добавки відомої маси  $m$  каліброваного стандартного зразку іонів елемента, що аналізується, виконуючи визначення часу інверсії послідовно у трьох видах розчину: фоновому розчині  $t_{\Phi}$  (для урахування забруднення електродів попередніми вимірюваннями), розчині проби  $t_{\Pi}$  та розчині проби з добавкою  $t_{Д}$ , за формулою:

$$C_{Me} = \frac{t_{\Pi} - t_{\Phi}}{t_{Д} - t_{\Pi}} \cdot m \cdot k, \quad (20)$$

де  $k$  — перевідний коефіцієнт для розрахунку масової концентрації елемента в пробі об'єкта за значеннями його концентрації у розчині проби.

Під час виконання паралельних вимірювань визначають середні значення часу інверсії у кожному розчині, які застосовують у розрахунку концентрації для однієї добавки за залежністю (20).

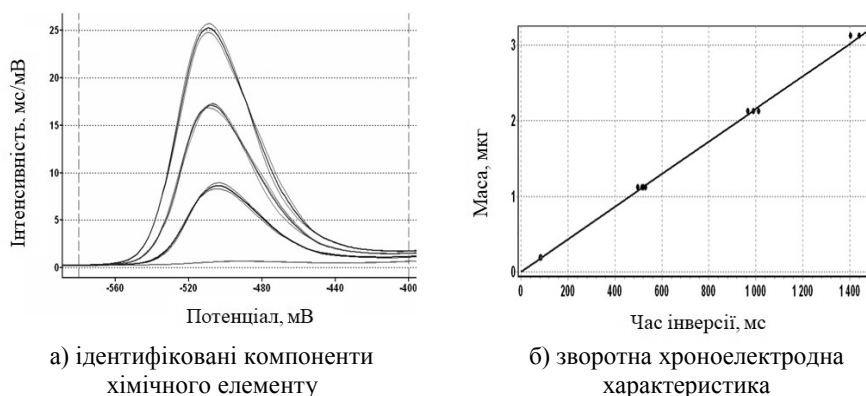


Рис. 13. Визначення концентрації хімічного елементу

В ІТ оцінювання концентрацій токсичних елементів може здійснюватися за значеннями декількох добавок (до п'яти), що підвищує точність та достовірність визначення. У цьому випадку для визначення невідомої маси іонів у пробі використовують лінійну зворотну хроноелектродну характеристику — залежність маси добавки від часу інверсії. Коефіцієнти лінійного рівняння характеристики визначають за методом найменших квадратів. На рис. 13 наведено приклад використання характеристики для вимірювання концентрації з двома добавками, в якому час інверсії відповідає площі ідентифікованої моделі компонента спектра, а характеристика будується за часом інверсії за відомими значеннями маси добавки в режимах вимірювання: фону, проби, 1 добавки, 2 добавок.

Аналізуючи точки графіку зворотної хроноелектродної характеристики, хімік-аналітик має можливість упевнитися в якості проведених досліджень, може додати або вилучити з розрахунку одержані значення паралельних вимірювань, підвищуючи точність визначення концентрацій хімічного елемента.

## ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЙ

Створення ІТ вимірювання концентрацій методами хронопотенціометрії базується на використанні описаних методів цифрового оброблення даних та застосуванні нових електрохімічних методів дослідження:

### цифрові методи

- перетворення системи координат;
- метод гістограмної фільтрації;
- спосіб усунення випадкових імпульсних завад та викидів;
- метод частотно-часової фільтрації;
- метод адаптивного згладжування даних;
- генеративна модель багатокомпонентного сигналу;

### електрохімічні методи

- базовий метод інверсійної хронопотенціометрії;
- метод імпульсної інверсійної хронопотенціометрії;
- метод диференційної імпульсної хронопотенціометрії;

- метод окислювальної імпульсної хронопотенціометрії;
- метод хроноіонометрії.

Запропонована ІТ має три основні етапи.

I. Перетворення структури даних.

II. Моделювання компонентів та визначення часу інверсії.

III. Визначення концентрацій хімічних елементів.

Встановлено, що для класу монотонно зростаючих сигналів, які є інтегральною сумою процесів багатокомпонентного вимірювання, можна застосувати перетворення системи координат, що складається з фільтрації, формування та диференціювання перетвореного корисного сигналу, водночас суттєво скорочуються дані без втрати корисної інформації. Одержаний сигнал аналізується як сума окремих компонентів.

Розроблені в рамках ІТ інструментальні засоби відновлення корисного сигналу за умов дії високочастотних завад можуть бути використані для вирішення завдань цифрового оброблення даних різної фізичної природи, що відповідають даному класу сигналів.

**Застосування ІТ в приладах для вимірювання концентрацій.** Для реалізації створеної ІТ у Міжнародному науково-навчальному центрі інформаційних технологій та систем НАН України та МОН України розроблено високочутливу аналітичну систему «Аналізатор ІХП», в якій застосовано інструментальні засоби та нові електрохімічні методи дослідження для вимірювання концентрацій 20-ти токсичних елементів в об'єктах навколишнього середовища [46, 47]. Для визначення концентрацій у комп'ютерній системі вимірювання використовують п'ять методів хронопотенціометричного аналізу.

«Аналізатор ІХП» дозволяє визначити масову концентрацію 14-ти токсичних елементів (ртуть, арсен, свинець, кадмій, цинк, мідь, олово, нікель, кобальт, залізо, марганець, селен, йод та хром) з чутливістю до  $0,05 \text{ мкг/дм}^3$  (50 ppt), шість хімічних елементів та сполук (калій, натрій, кальцій, фтор, амоній та нітрати) у діапазоні від  $10^3 \text{ мкг/дм}^3$  до  $6 \cdot 10^7 \text{ мкг/дм}^3$ .

Нові методи електрохімічного аналізу та унікальні способи вимірювання концентрацій хімічних елементів (селену, марганцю, йоду, заліза, хрому, кальцію, натрію, калію) захищено 12-ма патентами України на винахід [41–44, 48–55].

Комп'ютерна система аналізатора складається з двох незалежних підсистем оброблення даних, окремо для методів інверсійної хронопотенціометрії та методу хроноіонометрії, які об'єднано загальною інформаційною системою та вимірювальним пристроєм.

ІТ зберігає у базі даних довідкові дані гранично допустимих концентрацій різних типів об'єктів, що мають спільні нормативні значення: харчові продукти (хліб, молоко, зерно, дитяче харчування, продукція рослинництва та тваринництва), вода різного природного походження (питна, поверхнева, підземна, очищена), ґрунти різних типів, повітря робочої зони та ін., які регламентовані МОЗ України.

ІТ дає змогу формувати шаблони електрохімічних параметрів вимірювання елементів для різних методів дослідження та форми протоколів результатів вимірювання за допомоги інтелектуального інтерфейсу користувача, зберігати сигнали інтенсивності та результати вимірювання концентрацій елементів у архіві, що спрощує та покращує сервісне обслуговування праці хіміка-аналітика.

Розроблено шість методик вимірювання концентрацій 19-ти хімічних елементів у воді та ґрунтах новими методами дослідження, що підтверджує працездатність створених методів електрохімічного аналізу [56–61]. Методи можуть застосовуватися у сферах поширення Державного метрологічного контролю та нагляду, в санітарно-епідеміологічних станціях, науково-дослідних установах МОЗ України та НАН України, ветеринарних, агрохімічних, контрольно-токсикологічних лабораторіях агропромислового комплексу та інших галузей, які займаються визначенням слідових кількостей хімічних та токсичних елементів в об'єктах навколишнього природного середовища. «Пристрій для вимірювання концентрації важких металів» [41] став переможцем Всеукраїнського конкурсу «Винахід-2011» за ефективне рішення в хіміко-технологічній галузі; комплекс винаходів «Способи та пристрій для визначення концентрації мікроелементів у водних розчинах» [44, 48–55] став переможцем Всеукраїнського конкурсу «Винахід-2016» у номінації «Екологія».

Рівень розробки аналітичної системи «Аналізатор ІХП» відповідає сучасним європейським та світовим вимогам, за чутливістю вимірювання не поступається кращим світовим аналогам («РС-ЕТР» Чехія, аналізатор «797 VA Computrace» Швейцарія, «Model 600C» США).

## ВИСНОВКИ

Результати, які одержано у процесі розроблення ІТ, свідчать про перспективність застосування нових підходів та принципів цифрового оброблення слабких за рівнем сигналів складної форми, що монотонно змінюються, на основі розв'язання наступних задач:

- 1) перетворення структури даних вимірювання багатокomпонентних процесів;
- 2) застосування внутрішніх математичних характеристик (точок екстремумів та перегинів) для виконання фільтрації та згладжування даних без суттєвих спотворень форми та інтегральних характеристик сигналу;
- 3) моделювання компонентів для підвищення повторюваності та точності визначення концентрацій.

Ефективність високочутливої аналітичної системи «Аналізатор ІХП» підтверджено проведенням практичних досліджень визначення концентрацій хімічних елементів, затвердженням патентів України на винахід та широким впровадженням у лабораторіях для контролю якості питної води, харчових продуктів та виконання агрохімічних досліджень.

Під час розроблення технічних систем було виявлено, що до класу сигналів, які монотонно зростаючих та є інтегральною сумою вимірювань багатокomпонентних процесів, можна віднести дані, що мають зовсім іншу фізичну природу, а саме: сигнали динамічного зважування для визначення навантаження на осі автомобіля, системи дозування продуктів, підготовки бетонних сумішей, комбікормів тощо. Розроблені інструментальні засоби дали можливість побудувати нові ефективні прикладні інформаційні технології для цифрового оброблення таких сигналів та процесів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Гейровский Я., Кута Я. Основы полярографии. Москва: Мир, 1968. 558 с.
2. Brainina Kh. Z. Stripping Voltammetry in Chemical Analysis. New York, Toronto: Halsted Press, 1974. 222 p.
3. Карнаухов О.І., Гриневич В.В., Скобець Є.М. Диференціальний варіант інверсійної хронопотенціометрії із заданим опором в окислювальному ланцюгу. *Український хімічний журнал*. 1973. № 39. С. 710–714.
4. Захаров М.С., Баканов В.И., Пнев В.В. Хронопотенциметрия. Москва: Химия, 1978. 199 с.
5. Карнаухов О.І., Галімова В.М., Галімов К.Р. Теорія інверсійної хронопотенціометрії із заданим опором ланцюга. *Науковий вісн. НАУ*. 2000. № 32. С. 204–209.
6. Josipčuk B.V., Karnaukhov A.I., Surovtsev I.V., Povchan M.F. Inverznó-chronopotenciomerický analizátor ťažkých kovov. *Agrochemia. Slovakia*. 1993. 33, № 8. P. 19–21.
7. Galimova V.M., Surovtseva T.V. The assessment of the state of pollution of the waters of the transcarpathian rivers with heavy metals. *J. of water chem. and texnology*. 2011. Vol. 33, № 2. P. 111–116.
8. Surovtsev I.V., Galimova V.M., Mank V.V., Kopilevich V.A. Determination of heavy metals in aqueous ecosystems by the method of inversion chronopotentiometry. *J. of water chem. and texnology*. 2009. Vol. 31, № 6. P. 389–395.
9. Galimova V.M., Surovtsev I.V., Kopilevich V.A. Determination of Arsenic in the Water Using the Method of Inversion Chronopotentiometry. *J. of water chem. and texnology*. 2012. Vol. 34, № 6. P. 284–287.
10. Galimova V.M., Surovtsev I.V., Kopilevich V.A. Inversion-chronopotentiometric analysis of mercury in water. *J. of water chem. and texnology*. 2013. Vol. 35, № 5. P. 210–214.
11. Kopilevich V.A., Surovtsev I.V., Galimova V.M. Inversion-chronopotentiometry analysis of micro quantities of nickel and cobalt in the water. *J. of water chem. and texnology*. 2015. Vol. 37, № 5. P. 248–252.
12. Kopilevich V.A., Surovtsev I.V., Galimova V.M., Maksin V.I., Mank V.V. Determination of trace amounts of iodide-ions in water using pulse inverse chronopotentiometry. *J. of water chem. and texnology*. 2017. Vol. 39, No. 5. P. 1–5.
13. Гомеля М.Д., Шаблій Т.О., Копілевич В.А., Галімова В.М., Лаврик Р.В., Суровцев І.В. Екологічна безпека водних систем і моніторинг якості води: навч. посіб. Київ.: Нац. ун-т біотехн. і природокористування, 2013. 143 с.
14. Hong G., Hongfang Z., Yuanzhen Z. Progress in oscillographic chronopotentiometry. *Science in China Series B: Chemistry*. 2005. Vol. 48. P. 1–8.
15. Плэмзбек Дж.А. Электрохимические методы анализа. Основы теории и применение. Москва: Мир, 1985. 504 с.
16. Sparks Donald L. Environmental Soil Chemistry. New York: Acad. Press, 1995. 467 p.
17. Britz D. Digital Simulation in Electrochemistry. Springer, Berlin Heidelberg, 2005. 338 p.
18. Васильев В.И., Суровцев И.В. Индуктивные методы обнаружения закономерностей, основанные на теории редукции. *УСМ*. 1998. № 5. С. 3–14.
19. Васильев В.И., Суровцев И.В. Практические аспекты теории редукции в задачах обнаружения и моделирования закономерностей. *УСМ*. 2001. № 1. С. 6–15.
20. Файнзильберг Л.С. Информационные технологии обработки сигналов сложной формы. Теория и практика. Киев.: Наукова думка, 2008. 333 с.
21. Ивахненко А.Г., Степашко В.С. Помехоустойчивое моделирование. Киев: Наукова думка. 1985. 300 с.
22. Доленко С.А. Нейросетевые методы решения обратных задач. Нейроинформатика-2013. XV Всероссийская научно-техн. конф. Лекции по нейроинформатике. Москва, 2013. С. 214–269.
23. Пристрій для моделювання нелінійних моделей фізичних об'єктів: пат. 98987 Україна: МПК (2006) G05B 17/00, G06G 7/48. № a201008508; заявл. 07.07.10; опубл. 10.07.12, Бюл. № 13. 3 с.



24. Бабак О.В., Суровцев И.В., Татаринев А.Э. О целенаправленности перебора вариантов моделей при моделировании физических процессов. *УСиМ*. 2012. № 1. С. 3–7.
25. Суровцев И. В. Преобразование структуры данных при определении концентрации методом инверсионной хронопотенциометрии. *КиВТ*. 2015. № 180. С. 4–14.
26. Суровцев И.В. Метод цифровой фильтрации электрохимических сигналов в хронопотенциометрии. *КиВТ*. 2015. № 182. С. 4–14.
27. Спосіб гістограмної цифрової фільтрації хронопотенціометричних даних: пат. 96367 Україна: МПК (2006) G01N 27/48. № а201005608; заявл. 11.05.10; опубл. 25.10.11, Бюл. № 20. 8 с.
28. Суровцев И.В. Гістограмний метод фільтрації електрохімічних сигналів. *Науково-технічна інформація*. 2016. № 1. С. 49–54.
29. А. с. 845600 СССР Способ определения спектра аналогового сигнала / В.И. Скурихин, И.Д. Пономарева, П.М. Сиверский, Г.В. Цепков. СССР; опубл. 07.07.1981.
30. Пономарева И.Д., Цепков Г.В. Сверхбыстрый спектральный анализ. *Проблемы управления и информатики*. 1998. № 1. С. 107–114.
31. И.Д. Пономарева, Суровцев И.В., Математическое моделирование инерционного процесса, который испытывает периодическое возмущающее воздействие. *Пробл. бионики*. 1987. Вып. 42. С. 111–114.
32. Суровцев И.В. Метод адаптивного сглаживания электрохимических сигналов в хронопотенциометрии. *УСиМ*. 2015. № 5. С. 79–83.
33. Суровцев И. В., Татаринев А.Э., Галимов С.К. Моделирование дифференциальных хронопотенциограмм суммой нормальных распределений. *УСиМ*. 2009. № 5. С. 40–45.
34. Бабак О.В., Суровцев И.В., Татаринев А.Э. Моделирование инверсионно-хронопотенциометрического процесса измерения массовой концентрации отдельно взятого тяжелого металла. *УСиМ*. 2012. № 5. С. 88–92.
35. Татаринев А.Э., Суровцев И.В., Бабак О.В. Моделирование инверсионно-хронопотенциометрического процесса совместного измерения массовой концентрации двух тяжелых металлов. *УСиМ*. 2013. № 5. С. 84–87.
36. Татаринев А.Э., Галимов С.К., Суровцев И.В., Бабак О.В. Оценка качества моделирования скрытого фрагмента дифференциального графика хронопотенциограммы инверсии тяжелых металлов в жидкой пробе полярографа. *УСиМ*. 2014. № 2. С. 10–13.
37. Суровцев И.В. Моделирование многокомпонентных сигналов в хронопотенциометрии. *Киб. и выч. техн.* 2016. № 185. С. 5–21.
38. Каплан Б.Я. Импульсная полярография. Москва.: Химия, 1978. 239 с.
39. Суровцев И.В., Татаринев А.Э. Информационная технология измерения концентрации химических элементов методом импульсной хронопотенциометрии. *Автоматика-2005*. Харьков: ХПИ, 2005. Т.1. С.42–45.
40. Татаринев А.Э., Суровцев И.В. Использование методов импульсной хронопотенциометрии при измерении концентрации тяжелых металлов. *Вестн. ВПИ*. 2006. № 6 (69). С. 101–105.
41. Пристрій для вимірювання концентрації важких металів: пат. 96375 Україна: МПК (2006) G01N 27/48. № а201006798; заявл. 02.06.10; опубл. 25.10.11, Бюл. № 20. 6 с.
42. Пристрій для вимірювання концентрації токсичних елементів: пат. 107412 Україна: МПК (2006) G01N 27/48. № а201306295; заявл. 21.05.13; опубл. 25.12.14, Бюл. № 24. 2 с.
43. Аналого-цифровий електрохімічний пристрій для вимірювання параметрів розчинів: пат. 104062 Україна: МПК (2006) G01N 27/48. № а201206459; заявл. 28.05.12; опубл. 25.12.13, Бюл. № 24. 5с.
44. Пристрій для вимірювання параметрів водних розчинів: пат. 111689 Україна: МПК (2006) G01N 27/48. № а201505019; заявл. 22.05.15; опубл. 25.05.16, Бюл. № 10. 6 с.
45. Суровцев И.В., Галимов С.К. Алгоритм обработки данных измерения концентрации методом хроноонометрии. *УСиМ*. 2016. № 2. С. 85–91.
46. Суровцев И.В., Бабак О.В., Татаринев О.Е., Суровцева Т.В. Апаратно-програмний комплекс «Аналізатор ІХП» для вимірювання масової концентрації токсичних елементів. *Наука та іннов.* 2011. Т.7, № 3. С. 45–46.

47. Суровцев І.В., Бабак О.В., Волков Ю.М., Галімов С.К. Прилад інверсійної хронопотенціометрії для визначення концентрації важких металів та токсичних елементів у воді. *Безпека життєдіяльності*. 2013. № 12. С. 37–40.
48. Спосіб визначення заліза у водних розчинах: пат. 110752 Україна: МПК (2006) G01N 27/48, G01N 33/18, G01N 33/20, G01N 49/00. № а201413328; заявл. 12.12.14; опубл. 10.02.16, Бюл. № 3. 3 с.
49. Спосіб визначення хрому у водних розчинах: пат. 110893 Україна: МПК (2006) G01N 27/48, G01N 33/18, G01N 33/20, C01G 37/00. № а201412936; заявл. 03.12.14; опубл. 25.02.16, Бюл. № 4. 4 с.
50. Спосіб визначення йоду у водних розчинах: пат. 111040 Україна: МПК (2006) G01N 27/48, G01N 33/18, G01N 33/20, C01B 7/14. № а201501610; заявл. 24.02.15; опубл. 10.03.16, Бюл. № 5. 4 с.
51. Хронопотенціометричний спосіб визначення селену у водних розчинах: пат. 110744 Україна: МПК (2006) G01N 27/48, G01N 33/18, G01N 33/20, C01B 19/00. № а201408492; заявл. 25.07.14; опубл. 10.02.16, Бюл. № 3. 4 с.
52. Хронопотенціометричний спосіб визначення марганцю у водних розчинах: пат. 111000 Україна: МПК (2006) G01N 27/48, G01N 33/18, G01N 33/20, C01G 45/00. № а201406570; заявл. 12.06.14; опубл. 10.03.16, Бюл. № 5. 4 с.
53. Спосіб визначення кальцію у водних розчинах: пат. 113126 Україна: МПК (2006) G01N 27/48, G01N 27/49, G01N 33/18, G01N 33/20, C01F 11/00. № а201511155; заявл. 13.11.15; опубл. 12.12.16, Бюл. № 23. 4 с.
54. Спосіб визначення натрію у водних розчинах : пат. 113248 Україна: МПК (2006) G01N 27/48, G01N 27/49, G01N 33/18, G01N 33/20, C01D 13/00. № а201511153; заявл. 13.11.15; опубл. 26.12.16, Бюл. № 24. 3 с.
55. Спосіб визначення калію у водних розчинах : пат. 113356 Україна: МПК (2006) G01N 27/48, G01N 27/49, G01N 33/18, G01N 33/20, C01D 13/00. № а201511152; заявл. 13.11.15; опубл. 10.01.17, Бюл. № 1. 4 с.
56. Методика виконання вимірювання масової концентрації ртуті, миш'яку, нікелю та кобальту у воді методом інверсійної хронопотенціометрії : MBV 081/36-0762-11 / уклад. В.А. Копілевич, І.В. Суровцев, В.М. Галімова, К.Г. Козак. К.: Нац. ун-т біотехн. і природокористування, 2011. 23 с.
57. Методика виконання вимірювання масової концентрації свинцю, міді, цинку, кадмію у воді методом інверсійної хронопотенціометрії : MBV 081/36-0790-11 / уклад. В.А. Копілевич, І.В. Суровцев, В.М. Галімова, К.Г. Козак. К.: Нац. ун-т біотехн. і природокористування, 2011. 21 с.
58. Методика виконання вимірювання масової концентрації рухомих форм важких металів та токсичних елементів (Pb, Cu, Zn, Cd, Hg, As, Ni, Co) у ґрунтах методом інверсійної хронопотенціометрії : MBV 081/36-0833-12 / уклад. В.А. Копілевич, І.В. Суровцев, В.М. Галімова, К.Г. Козак. К.: Нац. ун-т біотехн. і природокористування, 2012. 26 с.
59. Методика виконання вимірювання масової концентрації токсичних елементів (Se, Mn, Cr, I, Fe) у воді методом інверсійної хронопотенціометрії : MBV 081/36-0935-14 / уклад. В.А. Копілевич, І.В. Суровцев, В.М. Галімова, К.Г. Козак. К.: Нац. ун-т біотехн. і природокористування, 2014. 25 с.
60. Методика виконання вимірювання масової концентрації калію, натрію та кальцію у воді методом хронопотенціометричної іонетрії : MBV 081/36-1012-2015 / уклад. В.А. Копілевич, І.В. Суровцев, В.М. Галімова. К.: Нац. ун-т біотехн. і природокористування, 2015. 16 с.
61. Методика вимірювання масової концентрації фтору, амонію та нітратів у воді методом хронопотенціометричної іонетрії : MBV 081/12-1023-2016 / уклад. В.А. Копілевич, І.В. Суровцев, В.М. Галімова. К.: Нац. ун-т біотехн. і природокористування, 2016. 30 с.

Отримано 12.12.2017

## REFERENCES

1. Geyrovskiy Ya., Kuta Ya. Fundamentals of Polarography. Moscow: Mir, 1968. 558 p. (in Russian).
2. Brainina Kh. Z. Stripping Voltammetry in Chemical Analysis. New York, Toronto: Halsted Press, 1974. 222 p.
3. Karnaukhov A.I., Grynevich V.V., Skobeets' Ye.M. Differential variant of inversion chronopotentiometry with a given resistance in the oxidation chain. *Ukrayins'kyi khimichnyy zhurnal*. 1973. no. 39. pp. 710–714 (in Ukrainian).
4. Zakharov M.S., Bakanov V.I., Pnev V.V. Chronopotentiometry. Moscow: Khimiya. 1978. 199 p. (in Russian).
5. Karnaukhov A.I., Galimova V.M., Galimov K.R. The theory of inversion chronopotentiometry with a given resistance of circuit. *Naukovyy visnyk NAU*. 2000. no. 32. pp. 204–209 (in Ukrainian).
6. Josipčuk B.V., Karnaukhov A.I., Surovtsev I.V., Povchan M.F. Inverznno-chronopotenciomerický analýzátor ťažkých kovov. *Agrochemia. Slovakia*. 1993. 33, № 8. P. 19–21.
7. Galimova V.M., Surovtseva T.V. The assessment of the state of pollution of the waters of the transcarpathian rivers with heavy metals. *J. of water chem. and texnology*. 2011. Vol. 33, № 2. P. 111–116.
8. Surovtsev I.V., Galimova V.M., Mank V.V., Kopilevich V.A. Determination of heavy metals in aqueous ecosystems by the method of inversion chronopotentiometry. *J. of water chem. and texnology*. 2009. Vol. 31, № 6. P. 389–395.
9. Galimova V.M., Surovtsev I.V., Kopilevich V.A. Determination of Arsenic in the Water Using the Method of Inversion Chronopotentiometry. *J. of water chem. and texnology*. 2012. Vol. 34, № 6. P. 284–287.
10. Galimova V.M., Surovtsev I.V., Kopilevich V.A. Inversion-chronopotentiometric analysis of mercury in water. *J. of water chem. and texnology*. 2013. Vol. 35, № 5. P. 210–214.
11. Kopilevich V.A., Surovtsev I.V., Galimova V.M. Inversion-chronopotentiometry analysis of micro quantities of nickel and cobalt in the water. *J. of water chem. and texnology*. 2015. Vol. 37, № 5. P. 248–252.
12. Kopilevich V.A., Surovtsev I.V., Galimova V.M., Maksin V.I., Mank V.V. Determination of trace amounts of iodide-ions in water using pulse inverse chronopotentiometry. *J. of water chem. and texnology*. 2017. Vol. 39, No. 5. P. 1–5.
13. Gomelya M.D., Shabliy T.O., Kopilevych V.A. Environmental safety of water systems and monitoring of water quality: teaching. manual. Kyiv: Nats. un-t biotekhn. i pryrodokorystuvannya, 2013. 143 p. (in Ukrainian).
14. Hong G., Hongfang Z., Yuanzhen Z. Progress in oscillographic chronopotentiometry. *Science in China Series B: Chemistry*. 2005. Vol. 48. P. 1–8.
15. Plembek J.A. Electrochemical methods of analysis. Fundamentals of the theory and application. Moscow: Mir, 1985. 504 p. (in Russian).
16. Sparks Donald L. Environmental Soil Chemistry. New York: Acad. Press, 1995. 467 p.
17. Britz D. Digital Simulation in Electrochemistry. Springer, Berlin Heidelberg, 2005. 338 p.
18. Vasil'yev V.I., Surovtsev I.V. Inductive methods for detecting regularities, based on the theory of reduction. *USiM*. 1998. No. 5. P. 3–14 (in Russian).
19. Vasil'yev V.I., Surovtsev I.V. Practical aspects of the theory of reduction in problems of detection and modelling of regularities. *USiM*. 2001. No. 1. P. 6–15 (in Russian).
20. Finezilberg L.S. Information technologies for processing complex-shaped signals. Theory and practice. Kiev: Naukova dumka, 2008. 333 p. (in Russian).
21. Ivakhnenko A.G., Stepashko V.S. Noise immunity modelling. Kiev: Naukova dumka, 1985. 300 p. (in Russian).
22. Dolenko S.A. Neural network methods for solving inverse problems. Neuroinformatics-2013. XV All-Russian nuchno-tehn. Conf. Lectures on neuroinformatics. Moscow, 2013. P. 214–269 (in Russian).
23. Device for simulation of nonlinear models of physical objects: pat. 98987, Ukraine: IPC (2006) G05B 17/00, G06G 7/48. № a201008508; claimed 07.07.10; published 10.07.12, Bull. № 13. 3 p. (in Ukrainian).

24. Babak O.V., Surovtsev I.V., A.E. Tatarinov On the purposefulness of the search of variants models in the modelling of physical processes. *USiM*. 2012. No. 1. P. 3–7.
25. Surovtsev I.V. Transformation of data structure in determining the concentration by methods of inversion chronopotentiometry. *KiVT*. 2015. No. 180. P. 4–14 (in Russian).
26. Surovtsev I.V. Method of digital filtration of electrochemical signals in chronopotentiometry. *KiVT*. 2015. No. 182. P. 4–14 (in Russian).
27. Method for histogram digital filtration of chrono-potentiometric data: pat. 96367, Ukraine: IPC (2006) G01N 27/48. № a201005608; claimed 11.05.10; published 25.10.11, Bull. № 20. 8 p. (in Ukrainian).
28. Surovtsev I.V. Histogram method for electrochemical signal filtration. *Naukovo-tekhnichna informatsiya*. 2016. No. 1. P. 49–54 (in Ukrainian).
29. Inventor's certificate 845600 USSR. Method for determining the spectrum of an analog signal / Skurikhin V.I., Ponomareva I.D., Siversky P.M., Tsepkov G.V.; published 07.07.1981 (in Russian).
30. Ponomareva I.D., Tsepkov G.V. Ultrafast Spectral Analysis. *Probl. upravleniya i informatiki*. 1998. No. 1. P. 107–114 (in Russian).
31. Ponomareva I.D., Surovtsev I.V. Mathematical modelling of the inertial process, which experiences a periodic perturbing effect. *Probl. Bionics*. 1987. Iss. 42. P. 111–114 (in Russian).
32. Surovtsev I.V. The method of adaptive smoothing of electrochemical signals in chronopotentiometry. *USiM*. 2015. No. 5. P. 79–83 (in Russian).
33. Surovtsev I.V., Tatarinov A.E., Galimov S.K. The modelling of the Differential Chronopotentiograms by the Sum of Normal Distributions. *USiM*. 2009. No. 5. P. 40–45 (in Russian).
34. Babak O.V., Surovtsev I.V., Tatarinov A.E. Modelling of the inversion-chronopotentiometric process of measuring the mass concentration of a single heavy metal. *USiM*. 2012. No. 5. P. 88–92 (in Russian).
35. Tatarinov A.E., Surovtsev I.V., Babak O.V. Modelling of the inversion-chronopotentiometric process of joint measurement of the mass concentration of two heavy metals. *USiM*. 2013. No. 5. P. 84–87 (in Russian).
36. Tatarinov A.E., Galimov S.K., Surovtsev I.V., Babak O.V. Estimation of the quality of the modelling of the latent fragment of the differential graph of the chronopotentiogram of the inversion of heavy metals in the liquid sample of the polarograph. *USiM*. 2014. No. 2. P. 10–13 (in Russian).
37. Surovtsev I.V. Modelling of multicomponent signals in chronopotentiometry. *Kibernetika i vychislitel'nââ tehnika*. 2016. No. 185. P. 5–21 (in Russian).
38. Kaplan B.Ya. Impulse Polarography. Moscow: Khimiya, 1978. 239 p. (in Russian).
39. Surovtsev I.V., Tatarinov A.E. Information technology for measuring the concentration of chemical elements by the method of impulse chronopotentiometry. *Automatics-2005*. Khar'kov: KhPI, 2005. Vol. 1. P. 42–45 (in Russian).
40. Tatarinov A.E., Surovtsev I.V. Using the methods of impulse chronopotentiometry in measuring the concentration of heavy metals. *Vesnik VPI*. 2006. No. 6 (69). P. 101–105 (in Russian).
41. Device for measurement of concentration of heavy metals: pat. 96375, Ukraine: IPC (2006) G01N 27/48. № a201006798; claimed 02.06.10; published 25.10.11, Bull. № 20. 6 p. (in Ukrainian).
42. Device for measuring the concentration of toxic elements: pat. 107412, Ukraine: IPC (2006) G01N 27/48. № a201306295; claimed 21.05.13; published 25.12.14, Bull. № 24. 4 p. (in Ukrainian).
43. Analog-digital electro-chemical device for measurement of parameters of solutions: pat. 104062, Ukraine: IPC (2006) G01N 27/48. № a201206459; claimed 28.05.12; published 25.12.13, Bull. № 24. 5 p. (in Ukrainian).
44. Device for measuring parameters of aqueous solutions: pat. 111689, Ukraine: IPC (2006) G01N 27/48. № a201505019; claimed 22.05.15; published 25.05.16, Bull. № 10. 6 p. (in Ukrainian).

45. Surovtsev I.V., Galimov S.K. The algorithm for processing the data of concentration measurement using the chrono-ionometry method. *USiM*. 2016. No. 2. P. 85–91 (in Russian).
46. Surovtsev I.V., Babak O.V., Tatarinov O.E., Surovtseva T.V. Hardware and software complex "Analyzer ICP" for measuring the mass concentration of toxic elements. *Nauka ta innovatsiyi*, 2011. Vol. 7. No. 3. P. 45–46 (in Ukrainian).
47. Surovtsev I.V., Tatarinov O.E., Galimov S.K. Device of Inversion Chronopotentiometry for Determining the Concentration of Heavy Metals and Toxic Elements in Water. *Bezpeka zhyttyedyial'nosti*. 2013. No. 12. P. 37–40 (in Ukrainian).
48. Method for determinating iron in aqueous solutions: pat. 110752, Ukraine: IPC (2006) G01N 27/48, G01N 33/18, G01N 33/20, G01N 49/00. № a201413328; claimed 12.12.14; published 10.02.16, Bull. № 3. 3 p. (in Ukrainian).
49. Method for the determination of chrome in aqueous solutions: pat. 110893, Ukraine: IPC (2006) G01N 27/48, G01N 33/18, G01N 33/20, C01G 37/00. № a201412936; claimed 03.12.14; published 25.02.16, Bull. № 4. 4 p. (in Ukrainian).
50. Method for iodine determination in aqueous solutions: pat. 111040, Ukraine: IPC (2006) G01N 27/48, G01N 33/18, G01N 33/20, C01B 7/14. № a201501610; claimed 24.02.15; published 10.03.16, Bull. № 5. 4 p. (in Ukrainian).
51. Chronopotentiometric method for determining selenium in water solutions: patent 110744, Ukraine: IPC (2006) G01N 27/48, G01N 33/18, G01N 33/20, C01B 19/00. № № a201408492; claimed 25.07.14; published 10.02.16, Bull. № 3. 4 p. (in Ukrainian).
52. Chronopotentiometric method for the determination manganese in aqueous solutions: pat. 111000, Ukraine: IPC (2006) G01N 27/48, G01N 33/18, G01N 33/20, C01G 45/00. № a201406570; claimed 12.06.14; published 10.03.16, Bull. № 5. 4 p. (in Ukrainian).
53. Method of determination of calcium in aqueous solutions: pat. 113126, Ukraine: IPC (2006) G01N 27/48, G01N 27/49, G01N 33/18, G01N 33/20, C01F 11/00. № a201511155; claimed 13.11.15; published 12.12.16, Bull. № 23. 4 p. (in Ukrainian).
54. Method of determination of sodium in aqueous solutions: pat. 113248, Ukraine: IPC. (2006) G01N 27/48, G01N 27/49, G01N 33/18, G01N 33/20, C01D 13/00. № a201511153; claimed 13.11.15; published 26.12.16, Bull. № 24. 3 p. (in Ukrainian).
55. Method of determining potassium in aqueous solutions: pat. 113356, Ukraine: IPC. (2006) G01N 27/48, G01N 27/49, G01N 33/18, G01N 33/20, C01D 13/00. № a201511153; claimed 13.11.15; published 10.01.17, Bull. № 1. 4 p. (in Ukrainian).
56. Kopilevich V.A., Surovtsev I.V., Galimova V.M., Cossack K.G. Measurement procedure of the mass concentration of mercury, arsenic, nickel and cobalt in water by the inverse chronopotentiometry method: MVV 081/36-0762-11. Kyiv: Nats. un-t biotekhn. i pryrodokorystuvannya, 2011. 23 p. (in Ukrainian).
57. Kopilevich V.A., Surovtsev I.V., Galimova V.M., Cossack K.G. Measurement procedure of the mass concentration of lead, copper, zinc, and cadmium in water by the method of inversion chronopotentiometry: MVV 081/36-0790-11. Kyiv: Nats. un-t biotekhn. i pryrodokorystuvannya, 2011. 21 p. (in Ukrainian).
58. Kopilevich V.A., Surovtsev I.V., Galimova V.M., Cossack K.G. Measurement procedure of the mass concentration of moving forms of heavy metals and toxic elements (Pb, Cu, Zn, Cd, Hg, As, Ni, Co) in soils by the inverse chronopotentiometry method: MVV 081/36-0833-12. Kyiv: Nats. un-t biotekhn. i pryrodokorystuvannya, 2012. 26 p. (in Ukrainian).
59. Kopilevich V.A., Surovtsev I.V., Galimova V.M., Cossack K.G. Measurement procedure of the mass concentration of toxic elements (Se, Mn, Cr, I, Fe) in water by the method of inversion chronopotentiometry: MVV 081/36-0935-14. Kyiv: Nats. un-t biotekhn. i pryrodokorystuvannya, 2014. 25p. (in Ukrainian).
60. Kopilevich V.A., Surovtsev I.V., Galimova V.M. Measurement procedure of the mass concentration of potassium, sodium and calcium in water by chronopotentiometric ionometry method: MVB 081/36-1012-2015. Kyiv: Nats. un-t biotekhn. i pryrodokorystuvannya, 2015. 16 p. (in Ukrainian).

61. Kopilevich V.A., Surovtsev I.V., Galimova V.M. Measurement procedure of the mass concentration of fluorine, ammonia and nitrates in water by chronopotentiometric ionometry method: MB 081/12-1023-2016. Kyiv: Nats. un-t biotekhn. i pryrodokorystuvannya, 2016. 30 p. (in Ukrainian).

Received 12.12.2017

*І.В. Суровцев*, д-р техн. наук,  
и.о. зав. отд. экологических цифровых систем  
e-mail: dep175@irtc.org.ua , igorsur52@gmail.com

*С.К. Галимов*, аспирант  
отд. экологических цифровых систем  
e-mail: dep175@irtc.org.ua

*А.Э. Татарінов*, науч. сотр.  
отд. экологических цифровых систем  
e-mail: dep175@irtc.org.ua

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

#### ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ТОКСИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ОБЪЕКТАХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Рассмотрена новая информационная технология, которая позволяет увеличить чувствительность и достоверность определения концентрации токсичных элементов методами импульсной инверсионной хронопотенциометрии. Для класса монотонно возрастающих сигналов, которые представляют собой интегральную сумму процессов многокомпонентного измерения, предложено преобразование системы координат, что позволяет анализировать сигнал как сумму компонентов, при этом существенно сокращаются исходные данные без потери полезной информации. Разработаны цифровые методы восстановления полезного сигнала и генеративная модель многокомпонентного сигнала, что увеличивает эффективность обработки данных.

Создана высокочувствительная аналитическая система «Анализатор ИХП», которая определяет массовую концентрацию 14-ти токсичных элементов (ртуть, мышьяк, свинец, кадмий, цинк, медь, олово, никель, кобальт, железо, марганец, селен, йод, хром) с чувствительностью до  $0,05 \text{ мкг/дм}^3$ , шесть химических элементов и соединений (калий, натрий, кальций, фтор, аммиак, нитраты) с концентрацией до  $6 \cdot 10^7 \text{ мкг/дм}^3$ . Разработанные инструментальные средства позволили создать новые эффективные информационные технологии обработки сигналов иной физической природы, которые монотонно возрастают либо уменьшаются.

**Ключевые слова:** преобразование структуры данных, импульсная хронопотенциометрия, моделирование, цифровая обработка, информационная технология.

I.V. Surovtsev, Dr (Engineering),

Acting Head of Department of Ecological Digital Systems

e-mail: dep175@irtc.org.ua , igorsur52@gmail.com

S.K. Galimov, Postgraduate Student,

Department of Ecological Digital Systems

e-mail: dep175@irtc.org.ua

O.E. Tatarinov, Researcher,

Department of Ecological Digital Systems

e-mail: dep175@irtc.org.ua

International Research and Training Center for Information Technologies

and Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine

and Ministry of Education and Science of Ukraine,

Acad. Glushkov av., 40, Kiev, 03187, Ukraine

## INFORMATION TECHNOLOGY FOR DETERMINING THE CONCENTRATION OF TOXIC ELEMENTS IN ENVIRONMENTAL OBJECTS

**Introduction.** *Insufficient sensitivity of the existing systems of measuring low concentrations of chemical elements during the implementation of quality control of drinking water, food products and other natural objects, as well as the lack of necessary means for digital processing of weak signals of complex form, leads to the task of developing an effective information technology for determining the concentration of toxic elements.*

**The purpose of the article** is to develop tools for information technology for determining the concentration of toxic elements. New methods of impulse inversion chronopotentiometry and ionometry to increase the sensitivity, reliability and functionality of the concentration measurement are used.

**Methods.** Transformation of data structure of the multi-component processes and new methods of a filtration and smoothing which are based on use of points of extremum and inflexion are applied at performance of digital processing of measurement signals. The transformation allows us to consider monotonically increasing signals of inversion as a linear sum of components, which are described by non symmetric functions of normal distribution. The received signal is simulated by solving the parametric identification problem in the class of one-dimensional regression models.

**Results.** The developed highly sensitive analytical system "Analyzer ICP" implements the created information technology. The system determines the mass concentration of 14 toxic elements (mercury, arsenic, lead, cadmium, zinc, copper, tin, nickel, cobalt, iron, manganese, selenium, iodine and chromium) with a sensitivity of up to  $0.05 \mu\text{g}/\text{dm}^3$  (50 ppt) and six chemical elements (potassium, sodium, calcium, fluorine, ammonium and nitrates) in the range of  $10^3 \mu\text{g}/\text{dm}^3$  to  $6 \cdot 10^7 \mu\text{g}/\text{dm}^3$  using ion-selective electrodes.

**Conclusion.** Information technology has an universal character, created tools can be used to analyze signals of various physical natures, in which the values are monotonically increasing or decreasing.

**Keywords:** transformation of the data structure, impulse chronopotentiometry, modelling, digital processing, information technology.

---

DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt191.01.032>

UDC 519.1

**V.M. KYKYO**, PhD (Engineering),  
Senior Researcher of Pattern Recognition Department  
e-mail: [vkiko@gmail.com](mailto:vkiko@gmail.com)  
International Research and Training Center  
for Information Technologies and Systems  
of the National Academy of Sciences of Ukraine  
and Ministry of Education and Science of Ukraine,  
Acad. Glushkov av., 40, Kiev, 03187, Ukraine

## MAXIMUM MATCHING IN WEIGHTED BIPARTITE GRAPHS

---

**Introduction.** The most important algorithms for bipartite graphs maximum matching are observed. These algorithms either find maximum matching in non-weighted bipartite graph (e.g. Hopcroft and Karp's algorithm —  $O(m\sqrt{n})$ ) or choose among all matchings with maximum size one having maximal cost (e.g. Edmonds and Karp's algorithm —  $O(mn + n^2 \log n)$ ). Provided that, in praxis new target settings and algorithms for finding maximum matching in bipartite graphs are also desirable.

**The purpose** of the article is to consider a new task setting and algorithms for maximum matching in weighted bipartite graphs as well as using these algorithms in fingerprint recognition.

**Methods.** Modified versions of finding maximum matching  $M$  in graph by searching and augmentation of  $M$ -augmenting paths are used.

**Results.** Weighted bipartite graph  $G = (V, E)$  with a cost function  $ce : E \rightarrow \{0, 1\}$ , that associates each edge with one of two possible values (e.g. 0 or 1) is considered. Maximum matching in the graph in new setting consists in finding among all matchings containing maximum number of edges with weight 1, one having maximal cardinality. Two algorithms with complexity  $O(m\sqrt{n})$  being modified versions of the Hopcroft-Karp algorithm are proposed. Examples of using these algorithms for removing gaps of lines and finding true correspondence of minutiae in fingerprint recognition are considered.

**Conclusions.** Proposed algorithms find maximum matching in input bipartite graph among all matchings having maximal cardinality in given subset of this graph edges. Using of proposed algorithms leads to increasing processing speed and reliability of fingerprint recognition.

**Key words:** maximum matching, bipartite graph, images.

V.M. KYKYO, 2018



## INTRODUCTION

Some recognition tasks are reduced to maximum matching in bipartite graphs. Let  $G = (V, E)$  be an input bipartite graph, maximum matching in this graph is a set  $M \subseteq E$  of maximum size such that no two edges in  $M$  have a common vertex.

Algorithms [2–5] for finding maximum matching in non-weighted bipartite graphs are based on searching  $M$ - augmenting paths in these graphs. Algorithm of Kuhn [2] has complexity  $O(mn)$  and consists of  $O(n)$  phases hereinafter  $m, n$  are numbers of graph edges and vertices. Kim and Chwa's algorithm [3] is similar to [2], but the search for shortest  $M$  - augmenting paths is performed in parallel with complexity  $O(n \log n \log \log n)$  using  $O(n^3 / \log n)$  processors. Hopcroft and Karp's algorithm [5] has lesser complexity  $O(m\sqrt{n})$  in comparison with [2], because in each phase it searches for all disjoint shortest  $M$  - augmenting paths. When the bipartite graph is dense, an algorithm [4] with complexity  $O(n^{1.5} \sqrt{m / \log n})$  may be preferable to use. The maximum matching problem in bipartite graphs can be reduced also to a maximum flow problem in graphs that can be solved in  $O(m\sqrt{n})$  time using Dinic's algorithm [6].

Algorithms [7–11] for finding maximum matching in weighted bipartite graphs choose among all maximum matchings one having maximum cost, i.e. maximum sum of matching edges weights. Therewith Kuhn's algorithm [7–9] has complexity  $O(mn^2)$  and Edmonds and Karp's algorithm [10] has complexity  $O(mn + n^2 \log n)$  using Fibonacci heap [11].

**The purpose of the article** is to consider a new task setting and algorithms for maximum matching in weighted bipartite graphs as well as usage of these algorithms in fingerprints recognition. Below target settings of maximum matching in bipartite graphs, two algorithms for maximum matching in weighted bipartite graphs in new setting and examples of usage these algorithms in fingerprints recognition are considered.

## TARGET SETTINGS OF MAXIMUM MATCHING IN BIPARTITE GRAPHS

Before target settings consideration let us introduce the main definitions.

**Definition1.** A bipartite graph  $G = (V = V1 \cup V2, E)$  is a graph whose vertices can be divided into two disjoint sets  $V1$  and  $V2$  such that every edge connects a vertex in  $V1$  to vertex in  $V2$ .

**Definition2.** A graph  $G$  is weighted if cost function  $ce : E \rightarrow R$  is defined, that associates each edge with a real value.

**Definition3.** A subset  $M \subset E$  is called a matching in graph  $G$  if no vertex is incident to more than one edge in  $M$ .

**Definition4.** A matching of maximum cardinality is called a maximum matching.

**Definition5.** A vertex in graph  $G$  is called  $M$  -free if it is incident with no edge in  $M$ .

**Definition6.** An  $M$  -augmenting path in  $G$  is a path whose original and terminal vertices are both  $M$  -free and whose edges are alternatively in  $E \setminus M$  and  $M$ .

**Definition7.** Problem 1 — find one maximum matching in graph  $G$ .

**Definition8.** Problem 2 — among all maximum matchings, choose one having maximum cost.

**Definition9.** Problem 3 — among all matchings having maximum cost, choose one having maximum cardinality.

In this paper three target settings of maximum matching searching in bipartite graphs are considered, the first two of which are known. The first setting (problem1) consists in finding maximum matching  $M$  in non-weighted graph that can be done by finding all  $M$ -augmenting paths in this graph. After finding the next  $M$ -augmenting path  $p$  new matching with size  $|M|+1$  is formed by excluding from previous matching all even edges and adding all odd edges in  $p$ , that means symmetric difference operation of sets  $M$  and  $p$ :  $M = M \oplus p$ . Not finding next  $M$ -augmenting path means finding of maximum matching because Berge's theorem [1] says that matching  $M$  in graph  $G$  is maximum, if and only if  $G$  contains no  $M$ -augmenting path.

Kuhn's algorithm [2] for finding maximum matching  $M$  in non-weighted graph checks for each  $M$ -free (free) vertex  $v \in V1$  whether there is  $M$ -augmenting path in graph that originates in this vertex and increases size of matching if such path exists. This algorithm consists of  $O(n)$  phases, in each of which only one  $M$ -augmenting path is searched and augmented. Therefore, the algorithm has complexity  $O(mn)$ . Hopcroft and Karp's algorithm [5] in each phase finds all  $M$ -augmenting shortest paths, performs lesser number of phases ( $O(\sqrt{n})$ ) in comparison with [2] and as a result has lesser complexity  $O(m\sqrt{n})$ .

The second setting (problem2) is due to the fact that some maximum matchings can be in graph and it is necessary to find among these matchings one having maximum cost. The third setting (problem3) is a new one and, in some sense, opposite to the second setting — it is necessary to find among all matchings having maximum cost one that is maximum in cardinality.

In this paper two algorithms for problem3 solution are proposed in the case when weight of each edge takes only one of two values, for example 0 and 1. Let  $MA$  be matchings in graph  $G$ , having maximal number of edges with weight that equals to 1. Proposed algorithms find in set  $MA$  those matching having maximum cardinality.

## TWO ALGORITHMS FOR MAXIMUM MATCHING IN BIPARTITE GRAPH

Let  $ce: E \rightarrow \{0,1\}$  be a cost function that associates each edge  $(v_1 \in V1, v_2 \in V2)$  in bipartite graph  $G=(V,E)$  with value that equals to 0 or 1. For example, cost function can be defined as  $ce(v_1, v_2) = cv(v_1) \vee cv(v_2), (v_1, v_2) \in E$  or  $ce(v_1, v_2) = cv(v_1) \wedge cv(v_2), (v_1, v_2) \in E$ , if given cost function  $cv: V \rightarrow \{0,1\}$  that associates each vertex with weight 0 or 1. Edge having weight that equals to 1 can be called basic or preferable. Stated above problem3 using such cost function  $ce$  is equivalent to following: find among all matchings having maximum number of basic edges one being maximum in cardinality. Let us consider two algorithms for solving this task. The first algorithm consists of the following five phases.

1. Subgraph  $G_1 \subset G$  is detected which consists of basic edges and vertices incident to these edges.
2. Searching of maximum matching  $M_1$  in subgraph  $G_1$  using Hopcroft and Karp's algorithm [5] is carried out.
3. Subgraph  $G_2 \subset G$  is formed by deletion in graph  $G$  matching  $M_1$  and all edges having common vertex with at least one edge from this matching.
4. Searching of maximum matching  $M_2$  in subgraph  $G_2$  is carried out.
5. Searching of maximum matching  $M_3$  in graph  $G$  is carried out with fulfillment of the following two conditions: 1) before searching  $M_3 = M_1 \cup M_2$  and 2) only those  $M_3$ -augmenting paths are searched and augmented, which do not reduce number of basic edges  $e \in M_3$ .

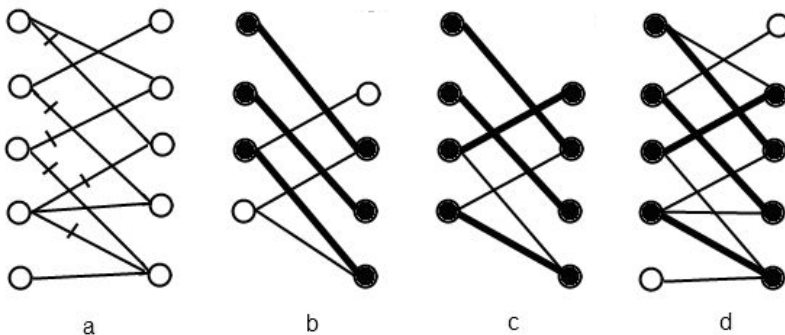
Three following statements are valid.

**Statement1.** Number of basic edges in any maximum matching  $M$  in graph  $G$  does not exceed size of matching  $M_1$ .

**Statement2.** Conjunction of matchings  $M_1 \subset G_1$  and  $M_2 \subset G_2$  is also matching and  $|M_1| + |M_2|$  does not exceed size of maximum matching  $M$  in graph  $G$ .

**Statement3.** Size of output matching  $M_3$  equals to size of maximum matching  $M$  in graph  $G$  if there is no  $M_3$ -augmenting path that decreases number of basic edges in  $M_3$  in final phase of the algorithm.

Let us consider an example of the algorithm work in bipartite graph that consists of ten vertices and ten edges, six basic edges of which are marked by cross marks (Fig. 1, a). In the first phase of the algorithm subgraph  $G_1 \subset G$  is constructed (Fig. 1, b) that consists of six basic edges and eight vertices incident to these edges. After the first two phases of the algorithm [5] in this subgraph matchings that consist respectively of three (Fig. 1, b) and four (Fig. 1, c) edges (shown by thick lines in Fig. 1) are received. Graph  $G_2$  in this example is empty, that is why matchings  $M_1$  (Fig. 1, c) and  $M_3$  (Fig. 1, d) are the same.



**Fig. 1.** Input graph  $G$  (a), matchings in graph  $G_1$  after the first (b) and the second (c) phases, matching  $M_3$  in graph  $G$  as result of the algorithm (d)

The second algorithm is modified version of Hopcroft and Karp's algorithm. The algorithm begins with empty matching  $M$  and in turn increases this matching in each of the next phases. In the next  $i$ -th phase all  $M$ -augmenting vertex-disjoint paths having the length that equals to  $i$  are searched. These paths in preference increase and at least do not reduce number of basic edges in  $M$ . After finding next  $M$ -augmenting path  $p$  operation  $M = M \oplus p$  is carried out which increases  $|M|$  and changes set of basic edges  $M1 \subset M$  if path  $p$  contains these edges. The algorithm's structure is presented below.

**Input.** Bipartite graph  $G = (V, E)$ , cost function  $ce: E \rightarrow \{0, 1\}$ , subset of basic edges  $\{e \in E \mid ce(e) = 1\} \subseteq E$ , matching  $M = 0$ , set of  $M$ -augmenting paths  $P = 0$ .

**Output.** Matching  $M \subseteq E$  that contains maximum number of basic edges.

**Repeat.** Find  $(P_1, P_2, \dots, P_k)$ , where  $P_i, i = 1, 2, \dots, k$  is a set of all vertex-disjoint  $M$ -augmenting paths, such that each path  $p \in P_i$  has length  $i$  and carrying out  $M = M \oplus p$  increases or at least not decreases number of basic edges in matching  $M$ .

$$P = (P_1 \cup P_2 \cup \dots \cup P_k)$$

$$M = M \oplus P$$

**Until**  $P \neq 0$ .

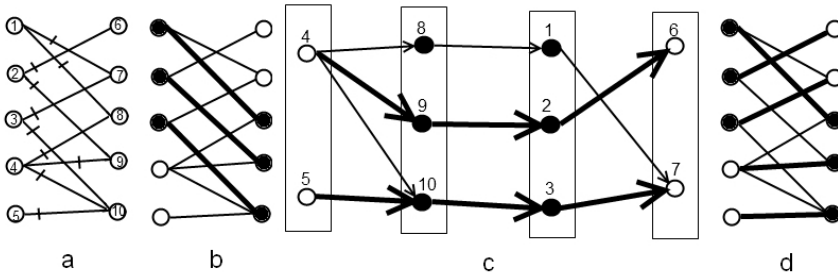
Let us consider the implementation of the algorithm in more detail. Let  $H$  be layered directed acyclic graph;  $L_i$  — set of vertices in  $i$ -th layer in graph  $H$ ;  $t$  — number of final layer in  $H$ ;  $in(w), w \in H$  — number of input edges in vertex  $w$ ;  $nmax = |M|$  — size of matching  $M$ ;  $n_2(p), n_1(p)$  — numbers of basic edges in path  $p \in H$ , thereafter covered and not covered by matching  $M$ ;  $dif(p) = n_1(p) - n_2(p)$  — weight of path  $p$ ;  $mdif(w), w \in H$  — maximal weight of paths terminated in vertex  $w$ .

Each phase of the algorithm consists of the following two parts: breadth-first (BFS) and depth-first search (DFS). Breadth-first search constructs graph  $H$  in which vertices of input graph  $G$  are located in layers. Therewith initial layer contains only free vertices  $v \in V1$ . All the following layers are formed by alternate adding either vertices  $v \in V2$ , connected with vertices of preceding layer by edges  $e \notin M$ , or vertices  $v \in V1$ , connected with vertices of preceding layer by edges  $e \in M$ . In the process of BFS unlike [5] values  $mdif(w), w \in H$  are defined using dynamic programming. Graph  $H$  construction is carried out up to one of the following conditions is valid: either next layer contains free vertex  $v \in V2$  or is empty (stopping of algorithm).

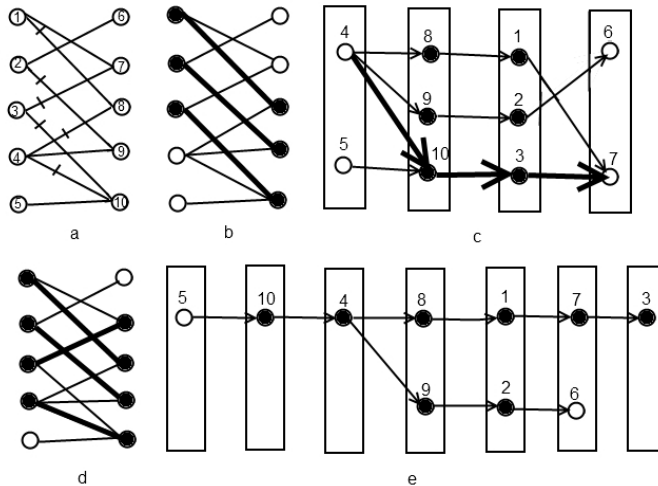
Let us consider an example of the algorithm work in input bipartite graph all ten edges of which are basic (Fig. 2, a). Matching consisting of three edges is received after the first phase of the algorithm work (Fig. 2, b). Four-layer graph  $H$ , constructed in the second phase, is presented in Fig. 2, c in which graph vertices are numerated (1–10), free vertices are shown by circles and other vertices (i.e. covered by matching) — by black spheres. The edges in graph  $H$  that belong to  $M$ -augmenting paths are shown by thick lines (Fig. 2, c). In result of the second phase maximum matching consisting of five edges is received (Fig. 2, d).

DFS finds all vertex-disjoint paths in graph  $H$  which have length  $t$  and do not reduce the number of basic edges in matching  $M$ . Searching of each path starts in free vertex  $u$  of the last layer given  $mdif(u) \geq 0$  and propagates per edges to non-used during DFS vertices in the preceding layer. Ending this search in free vertex of initial layer means that  $M$ -augmenting path is traced and will be thereafter augmented.

In the example, presented in Fig. 2, graph  $G$  has only basic edges and all paths in graph  $H$  terminated in free vertices six or seven have the same weight  $dif(p) = 1$  (Fig. 2, c). There are four such paths but only two of them have no common vertices and are augmented.



**Fig. 2.** Input graph  $G$  (a), matching (three edges) afterwards the first phase of algorithm (b), four-layered graph  $H$  in the second phase (c) and maximum matching (d) after two phases



**Fig. 3.** Input graph  $G$  (a), matching (three edges) afterwards the first phase of algorithm (b), graph  $H$  in the second phase (c), output matching (d) as the result of the second phase and seven-layered graph  $H$  in the third phase (e), that contains no  $M$ -augmenting paths

In the next example presented in Fig. 3 only six edges in graph  $G$  are basic. There are four paths in the second phase (Fig. 3, c) having free vertices in terminal points (4-10-3-7, 4-8-1-7, 4-9-2-6 and 5-10-3-7) and path (4-10-3-7) has maximal weight that equals to 1. Other three ways (with weights 0, -1, 0) have common vertices with this path and therefore are not used. There is only one path in graph  $H$  in the next (third) phase having free terminal vertex (Fig. 3, e). The weight of this path is equal to -2 and it is not used because its augmentation will decrease number of basic edges in matching. Graph  $H$  in this phase has seven layers because the next eighth layer is empty. Output result of algorithm's work is the matching that consists of four edges (Fig. 3, d).

The algorithm may be expressed in the following pseudocode.

**Repeate**

$t = 0$ ; BFS;

**if** ( $t > 0$ )DFS;

**Until**  $t > 0$

**BFS - Constructing graph  $H$  by breadth-first search:**

1. Add to  $L_0$  all free vertices from  $V1$ . Let  $i = n \max = 0$ ,  $mdif(w) = 0 \mid w \in L_0$ ;

2. Form next layers of graph  $H$  until recurrent layer either is empty or contains free vertices  $u \in V2$ :

**Repeate**

**for** (all vertices  $u \in L_i$ )

**for** (all vertices  $w$  adjacent to  $u$  using unmatched edges)

**if** (no layer containing  $w$ )

add  $w$  to  $L_{i+1}$ ; let  $mdif(w) = mdif(u)$ ,  $in(w) = 1$ ;

**else if** ( $w \in L_{i+1}$ )

let  $mdif(w) = \max(mdif(w), mdif(u) + ce(u, w))$ ,

$in(w) = in(w) + 1$ ;

**if** ( $L_{i+1}$  contains free vertex and  $mdif(u) \geq 0$ ) let  $t = i + 1$ ;

**else if** ( $L_{i+1}$  is empty)  $t = -t$ ;

**else**

**for** (all vertices  $u \in L_{i+1}$ )

**for** (all vertices  $w$  adjacent to  $u$  using matched edges)

**if** (no layer containing  $w$ )

add  $w$  to  $L_{i+2}$ ; let

$mdif(w) = mdif(u) - 1$ ;

$mdif(w) = \max(mdif(w), mdif(u) - ce(u, w))$ ;

let  $i = i + 2$ ;

**Until** ( $t = 0$ )

**DFS - searching and augmentation of  $M$ -augmenting paths in graph  $H$  :**

**for** (all free vertices  $u \in L_{i+1}$ , ordered by value  $mdif(u)$ )

**if** (there is path  $p$  from  $u \in L_{i+1} \mid mdif(u) \geq 0$  to one of free vertices  $w \in L_0$ )

delete each vertex  $v$  and its outgoing edges in  $p$ . Under deletion each edge  $(v, vout)$  let  $in(vout) = in(vout) - 1$  (if  $in(vout) = 0$ , delete  $vout$  and its outgoing edges). Delete from  $M$  all edges  $e \in p$  and add other edges  $e \notin M$  from this path. Let  $nmax = nmax + 1$ .

The algorithm finds matching  $M$  in graph  $G$  that contains maximum number of basic edges. This matching is maximum if in final phase there are no  $M$ -augmenting paths augmentation of which reduces number of basic edges in  $M$ . Proposed algorithms have complexity  $O(m\sqrt{n})$ .

**MAXIMUM MATCHING IN FINGERPRINT RECOGNITION**

Algorithms for comparing fingerprints based on detection and matching of minutiae (papillary lines ends and bifurcations) are considered to be still the best, with the highest matching capability. Using these algorithms a simple rigid transformation (translating, rotating and scaling) is searched at first to align the input fingerprint  $Q$  with the template fingerprint  $T$ , each represented by its minutiae pattern. After aligning similarity measure or binary decision of whether two fingerprint images are from the same finger or not must be determined and returned. In two roughly aligned images every two minutiae ( $q \in Q, p \in T$ ) may be considered as matched (corresponding with one another) only if their distance (location and angle) is in tolerance box under known transformation. Not only pairs but often overlapped groups of closely located minutiae occur, that is why finding true minutia matching usually is not a simple task. In [12, 13] matching is searched using rather simple locally optimal algorithm, which may not so often find true matching of minutiae because of its locality. In [14] Ford-Fulkerson algorithm for finding optimal global matching is used provided by T. Cormen et.al. [15]. This algorithm finds the maximum flow in non weighted bipartite graph with complexity  $O(nm)$ , vertices  $v \in V1$  ( $v \in V2$ ) of which correspond to minutiae in the first (second) image and each edge — to pair of vertices closely spaced after aligning (registration). In [16] finding of minutiae matching is based on searching of matching with minimal cost in weighted bipartite graph using algorithm [17] with complexity  $O(n^3)$ . Algorithms [14, 16] have worse complexity in comparison with [5] that restricts their using in praxis. Another possible drawback of algorithms [12–14] is that they do not use validity data of minutiae which may be formed in process of their detection in fingerprints. In the issue spurious minutiae, having the same influence as true minutiae, may lead to errors in recognition.

One of challenges for [12–14, 16] and other minutiae-based algorithms consists in missing and spurious minutiae in fingerprint images. To reduce effect of these minutiae we propose to classify minutiae in two types (reliable and doubtful) and use weighted bipartite graph  $G = (Q \cup T, E)$  with cost function  $ce: E \rightarrow \{0, 1\}$ ,

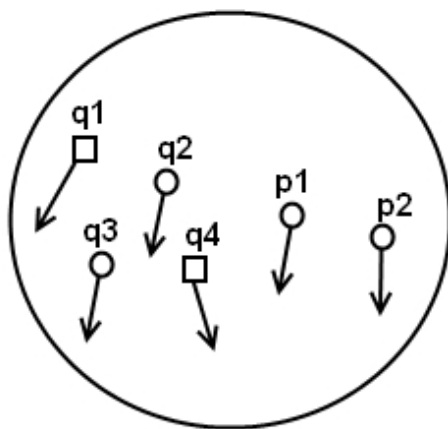
where  $Q$  and  $T$  are sets of minutiae in input  $I_Q$  and template  $I_T$  images. Therewith weight of edge  $e(q \in Q, p \in T)$  equals to 1 (reliable edge) if the following two conditions are satisfied: 1) minutiae corresponding to vertex  $q$  is considered to be reliable, because it is detected using comparatively rigorous rules and 2) distance (coordinates and angle) of minutiae  $q$  and  $p$  after aligning is in certain tolerance box. Minutiae in template image  $T$  are considered as reliable.

Maximum matching  $M_{QT}$  in bipartite graph can be searched using one of two proposed algorithms. Similarity (matching) degree of two compared images (0–100%) can be defined as follows:

$$\text{sim}(I_Q, I_T) = 100(kne_1 + ne_2) / n, \quad (1)$$

where coefficient  $1 \leq k \leq 2$ ;  $ne_1, ne_2$  are numbers of edges in  $M_{QT}$ , having weight 1 and 0;  $n$  is total number of minutiae in intersection region of these two images.

In Fig. 4 an example of closely spaced minutiae set in images  $I_Q$  (four points) and  $I_T$  (two points) after registration is shown: reliable (doubtful) minutiae are marked by circles (squares) and their angles are shown by arrows. All these minutiae fall into the same tolerance box shown in Fig. 4 by big circle. That is why every two minutiae in this set can be matched but the task is to find optimal matching. Similarity degree of this minutiae set defined by (1) takes the following values depending on choosing minutiae matched pairs: 66% (two pairs of matched reliable minutiae:  $(q_2, p_1), (q_3, p_2)$ ), 50%  $((q_1, p_1), (q_2, p_2))$  and 33%  $((q_1, p_1), (q_4, p_2))$ . Therewith maximal similarity (66%) corresponds to preferential matching of reliable minutiae using proposed algorithms. In general tolerance boxes for reliable and doubtful minutiae may have different size. Searching maximal similarity degree depending on reliability of matched minutiae seems to be positive feature in comparison with [12–14, 16].



**Fig. 4.** An example of closely spaced minutiae after registration in two compared fingerprint images  $I_Q$  (four points  $q$ ) and  $I_T$  (two points  $p$ )



The second example corresponds to removing of noise gaps in lines and curves in vectorized image, in particular fingerprint image. Vectorized image represents graph vertices of which correspond to ends and crossings of lines and edges — to line or curve segments in image. Errors in gaps removing lead to spurious minutiae and hereupon to errors in fingerprints recognition. Task of gaps removing can be reduced to searching of maximum matching in weighted bipartite graph vertices of which correspond to ends of lines in image. Each edge in this graph connects two vertices if distance (location and angle) of corresponding end points is in certain tolerance box  $b$ . Therewith edge has weight that equals to 1 (basic edge) if distance of corresponding end points is in tolerance box, size of which is essentially smaller than size of  $b$  and equals to 0 otherwise. Searching of maximum matching in this graph can be carried out using one of proposed above algorithms.

Examples indicate that using of the proposed algorithms leads to increasing processing speed and reliability of fingerprint recognition. Testing software for fingerprints recognition using developed algorithms will be the next step of research.

## CONCLUSIONS

New setting for finding maximum matching in bipartite graph which set of edges is splitted into two subsets is proposed: find maximum matching in this graph among all matchings having maximum cardinality in one of these subsets. Two algorithms for searching maximum matching in this setting are also proposed, which are based on using Hopcroft and Karp's algorithm and have complexity  $O(m\sqrt{n})$ . These algorithms can be modified by splitting set of edges in bipartite graph more than in two subsets. Preliminary analysis indicates that most likely using of proposed algorithms leads to the increasing processing speed and reliability of fingerprint recognition.

## REFERENCES

1. C. Berge. Two theorems in graph theory. *In Proc. National Academy Sciences, USA*. 1957. P. 842–844.
2. J.A. Bondy and U.S.R. Murty. Graph theory with applications. *Mac Millan, New York*, 1976.
3. T. Kim and K.Y. Chwa. An  $O(n \log n \log \log n)$  parallel maximum matching algorithm for bipartite graphs. *Inf. Proc. Letters*. 1987. 24(1), P. 15–17.
4. H. Act, N. Blum, K. Mehlhorn, and M. Paul. Computing a maximum cardinality matching in a bipartite graph in time  $O(n^{1.5} \sqrt{m / \log n})$ . *Inf. Proc. Letters*. 1991. 37, P. 237–240.
5. J. Hopcroft and R. Karp. An  $n^{5/2}$  algorithm for maximum matching in bipartite graphs. *SIAM Journal Comput.* 1973. 2(4), P. 225–231.
6. E.A. Dinic. Algorithm for solution of a problem of maximum flow in a network with power estimation. *Soviet Math. Dokl.* 1970. 11(5), P. 1277–1280.
7. H.W. Kuhn. The Hungarian method for the assignment problem. *Naval Res. Logist., Quart.* 1955. 2. P. 83–97.
8. H.W. Kuhn. Variants of the Hungarian method for the assignment problem. *Naval Res. Logist., Quart.* 1956. 3. P. 253–258.
9. J. Munkres. Algorithms for the assignment and transportation problems. *J. Soc. Indust. Appl. Math.* 1957, P. 32–38.

10. J. Edmonds and R. Karp. Theoretical improvements in algorithmic efficiency for network flow problems. *J. of the Assoc. for Comput. Mach.* 1972. 19(2), P. 248–264.
11. M.L. Fredman and R.E. Tarjan. Fibonacci heaps and their uses in improved network optimization algorithms. *In 25<sup>th</sup> FOCS*. 1984. P. 338–346.
12. H.V. Gasparian, A.A. Kirakosian. The comparison system of fingerprints by local features. *Vestnik of RAU, Natural Science, Physics and Mathematics*. 2006. P. 85–91. (in Russian).
13. A.S. Rykanov. Analysis of fingerprint authentication and verification methods. *Systems for information processing*. 6(87). 2010. P. 164–181. (in Russian).
14. Chengfeng Wang, Marina Gavrilova, Yuan Luo and Jon Rokne. An efficient algorithm for fingerprint matching. *ICPR*. 1. 2006. P. 1034–1037.
15. T. Cormen, C. Leiserson, R. Rivest and C. Stein. Introduction to algorithm. The MIT Press, 2002.
16. V.M. Kyyko, V.V. Matsello. Fingerprints recognition based on searching of corresponding points. *Control systems and machines*. № 3. 2005. P. 36–41 (in Russian).
17. R. Jonker R., A. Volgenant. A shortest augmenting path algorithm for dense and sparse linear assignment problems. *Computing* 38. 1987. P. 325–340.

Received 24.11.2017

#### ЛИТЕРАТУРА

1. C. Berge. Two theorems in graph theory. *In Proc. National Academy of Sciences, USA*. 1957. pp. 842–844.
2. J.A. Bondy and U.S.R. Murty. Graph theory with applications. Mac Millan, New York, 1976.
3. T. Kim and K.Y. Chwa. An  $O(n \log n \log \log n)$  parallel maximum matching algorithm for bipartite graphs. *Inf. Proc. Letters*, 24(1), pp.15–17, 1987.
4. H. Act, N. Blum, K. Mehlhorn, and M. Paul. Computing a maximum cardinality matching in a bipartite graph in time  $O(n^{1.5} \sqrt{m / \log n})$ , *Inf. Proc. Letters*, 1991. 37, pp. 237–240.
5. J. Hopcroft and R. Karp. An  $n^{5/2}$  algorithm for maximum matching in bipartite graphs. *SIAM Journal Comput.* 2(4), 1973. pp. 225–231,
6. E.A. Dinic. Algorithm for solution of a problem of maximum flow in a network with power estimation. *Soviet Math. Dokl.* 1970. 11(5). P. 1277–1280.
7. H.W. Kuhn. The Hungarian method for the assignment problem. *Naval Res. Logist., Quart.* 1955. 2, pp. 83–97,
8. H.W. Kuhn. Variants of the Hungarian method for the assignment problem. *Naval Res. Logist. Quart.* 1956. 3, pp. 253–258,
9. J. Munkres. Algorithms for the assignment and transportation problems. *J. Soc. Indust. Appl. Math.* 1957. pp. 32–38,
10. J. Edmonds and R. Karp. Theoretical improvements in algorithmic efficiency for network flow problems. *J. of the Assoc. for Comput. Mach.* 19(2), 1972. pp. 248–264.
11. M.L. Fredman and R.E. Tarjan. Fibonacci heaps and their uses in improved network optimization algorithms. *In 25<sup>th</sup> FOCS*, 1984. pp. 338–346.
12. Гаспарян А.В., Киракосян А.А. Система сравнения отпечатков пальцев по локальным признакам. *Вестник РАУ. Серия физико-математические и естественные науки*. 2006. С. 85–91.
13. Рыканов А.С. Анализ методов распознавания отпечатков пальца. *Системы обработки информации*. 2010. Вып. 6 (87). С. 164–171.
14. Chengfeng Wang, Marina Gavrilova, Yuan Luo and Jon Rokne. An efficient algorithm for fingerprint matching. *ICPR*, 1. 2006. P. 1034–1037.
15. T. Cormen, C. Leiserson, R. Rivest and C. Stein. Introduction to algorithm. The MIT Press, 2002.
16. Кийко В.М., Мацелло В.В. Сравнение изображений отпечатков пальцев на основе поиска соответствия особых точек. *Управляющие системы и машины*, 2015, 3, стр. 36–41.
17. R.Jonker R., A.Volgenant. A shortest augmenting path algorithm for dense and sparse linear assignment problems. *Computing* 38, 1987, pp. 325–340.

Получено 24.11.2017

В.М. Куйко, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.,  
 відд. розпізнавання образів  
 e-mail: vkiiko@gmail.com

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

## ЗНАХОДЖЕННЯ НАЙБІЛЬШОГО ПАРОСПОЛУЧЕННЯ НА ЗВАЖЕНОМУ ДВОДОЛЬНОМУ ГРАФОВІ

**Вступ.** Розглянуто найвідоміші алгоритми пошуку найбільшого паросполучення на дводольному графові, які або виконують пошук найбільшого паросполучення на незваженому дводольному графові, або вибирають із множини найбільших паросполучень одне, яке має найбільшу суму вагів ребер. Ці алгоритми активно вживаються при розв'язанні різних оптимізаційних задач, але на практиці є також потреба в інших постановках і алгоритмах пошуку найбільшого паросполучення на дводольних графах.

**Мета** статті — розглянути нові постановки завдання щодо знаходження найбільшого паросполучення на зваженому дводольному графові, алгоритми розв'язання цієї задачі, а також використання цих алгоритмів при розпізнаванні папілярних зображень.

**Методи.** Використовуються модифіковані версії пошуку найбільшого паросполучення  $M$  на дводольному графові на основі пошуку та аугментації  $M$  - збільшувючих шляхів на цьому графові.

**Результати.** Розглянуто нову постановку пошуку найбільшого паросполучення на зваженому дводольному графові, ваги ребер якого набувають два значення (наприклад, 0 і 1): знайти всі паросполучення, що мають найбільшу кількість ребер з вагою 1, і вибрати серед них таке паросполучення, що має найбільшу кількість ребер. Запропоновано два алгоритми пошуку найбільшого паросполучення у цій постановці зі складністю  $O(m\sqrt{n})$ . Розглянуто приклади вживання цих алгоритмів для усунення розривів ліній та пошуку відповідності особливих точок на порівнюваних відбитках пальців при розв'язанні задачі розпізнавання папілярних зображень.

**Висновки.** Запропоновано нові алгоритми пошуку найбільшого паросполучення на зваженому дводольному графові. Використання запропонованих алгоритмів призводить до пришвидчення та зростання надійності розпізнавання зображень відбитків пальців.

**Ключові слова:** найбільше паросполучення, дводольний граф, зображення.

*В.М. Кийко*, канд. техн. наук, старш. науч. сотр.

отд. распознавания образов

e-mail: [vkiiiko@gmail.com](mailto:vkiiiko@gmail.com)

Международный научно-учебный центр информационных

технологий и систем НАН Украины и МОН Украины,

пр. Академика Глушкова, 40, г. Киев, 03187, Украина

#### НАХОЖДЕНИЕ НАИБОЛЬШЕГО ПАРОСОЧЕТАНИЯ

#### НА ВЗВЕШЕННОМ ДВУДОЛЬНОМ ГРАФЕ

Рассмотрена новая постановка задачи нахождения наибольшего паросочетания на взвешенном двудольном графе, веса ребер которого принимают два значения (например, 0 и 1): найти все паросочетания, содержащие наибольшее количество ребер с весом 1, и выбрать среди них наибольшее по размеру паросочетание. Предложены два алгоритма поиска наибольшего паросочетания на двудольном графе в новой постановке со сложностью  $O(m\sqrt{n})$ . Рассмотрены примеры применения этих алгоритмов для устранения разрывов линий и поиска соответствия особых точек на двух сравниваемых отпечатках пальцев при решении задачи распознавания папиллярных изображений.

**Ключевые слова:** *наибольшее паросочетание, двудольный граф, изображения.*

DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt191.01.045>

УДК 629.7.05

**В.І. ГРИЦЕНКО**, член-кореспондент НАН України,  
директор Міжнародного науково-навчального центру  
інформаційних технологій та систем НАН України та МОН України  
e-mail: [vig@irtc.org.ua](mailto:vig@irtc.org.ua)

**О.Є. ВОЛКОВ**, старш. наук. співроб.,  
відд. інтелектуального керування  
e-mail: [alexvolk@ukr.net](mailto:alexvolk@ukr.net)

**М.М. КОМАР**, наук. співроб.,  
відд. інтелектуального керування  
e-mail: [nickkomar08@gmail.com](mailto:nickkomar08@gmail.com)

**Ю.П. БОГАЧУК**, канд.техн.наук, старш. наук. співроб.,  
відд. інтелектуального керування  
e-mail: [dep185@irtc.org.ua](mailto:dep185@irtc.org.ua)

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

## ИНТЕЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ СУЧАСНИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ

---

*Розглянуто питання необхідності створення нової перспективної системи керування безпілотними літальними апаратами і розроблення методів її інтелектуалізації. Запропоновано ідеї застосування теорії інваріантності та автономності для синтезу перспективних систем керування, а також ряд методів для забезпечення високого рівня їх інтелектуалізації. Запропоновано підхід до вирішення завдання, оснований на теорії високоточного дистанційного керування динамічними об'єктами, а також на комплексній взаємодії методів теорії автономності, адаптивного керування та інтелектуалізації процесів керування динамічними об'єктами.*

**Ключові слова:** безпілотний літальний апарат, система керування, інваріантність, інтелектуалізація, автономність.

### ВСТУП

Останніми роками авіація стає значною мірою безпіотною. Безпілотні літальні апарати (БпЛА) поступово стають головною продукцією багатьох авіаційних фірм. З'являється велика кількість розробників і виробників

БпЛА, які займаються лише безпілотними апаратами та системами. Це відбувається з ряду причин. БпЛА, зазвичай, набагато дешевші пілотованих літаків і вертольотів. Дешевше, ніж підготовка пілота, обходиться і підготовка оператора безпіотної системи. Відсутність пілота дає змогу не долучати бортові системи життєзабезпечення, зменшити масу та габарити БпЛА, а також збільшити діапазон допустимих перевантажень і чинників, які впливають на якість пілотування. Велике значення має і чинник безпеки — втрати безпілотних апаратів не призводять до втрати пілотів.

Стрімке зростання кількості розробок БпЛА саме в останнє десятиріччя не є випадковим. Цьому сприяли певні об'єктивні передумови, які назріли саме до цього часу. Вони пов'язані з серйозними технологічними успіхами в різних галузях [1].

Удосконалення БпЛА нерозривно пов'язано з етапами розвитку авіації загалом. Сьогодні інформаційні технології докорінно змінили уявлення про БпЛА та розширили сферу їх цивільного застосування. Порівняно з пілотованою авіацією, використання БпЛА незамінне під час виконання складних та небезпечних завдань. БпЛА використовують для інтелектуальних завдань, наприклад, таких як: розвідка, спостереження, безпека кордонів, ідентифікація та позначення цілі, ретрансляція зв'язку, постановки радіозавад, правоохорона безпека, моніторинг стану навколишнього середовища та сільського господарства, дистанційне зондування та інші завдання.

Безпілотний літальний апарат — це літальний апарат багаторазового або умовно-багаторазового використання, який здатний самостійно цілеспрямовано переміщатися в повітрі для виконання різних функцій в автономному режимі (за допомоги власної керуючої програми) або за допомоги дистанційного керування (що здійснюється людиною-оператором зі стаціонарного або мобільного пульта керування).

Зазвичай, БпЛА є частиною системи, яка забезпечує його функціонування. Безпілотна авіаційна система (БАС) — це сукупність БпЛА з наземним пунктом дистанційного керування та персоналом, який ним керує і забезпечує його функціонування, та каналами керування і зв'язку зі споживачами результатів функціонування.

Розвиток безпілотних авіаційних систем став новою сторінкою в історії авіації та космонавтики. Потенціал України у створенні та використанні БАС кожного року зростає. Нині наша країна фігурує як країна-виробник та споживач послуг як цивільних БпЛА, так і БпЛА військового призначення.

## **АКТУАЛЬНІСТЬ**

Ефективність виконання поставлених завдань, безпека польоту, експлуатаційна придатність і ряд інших, не менш важливих якостей рухомих об'єктів, зокрема БпЛА, значною мірою визначаються здатністю системи автоматичного керування (САК) виконувати свої функції. Розвиток САК, до якої входить автопілот (АП), характеризується постійним збільшенням числа вирішуваних завдань і підвищенням їх складності, розширенням інтелектуальних і адаптивних можливостей БАС. Основні відмінні якості САК БпЛА — це, перш за все, розвинена архітектура і високий інтелект, що забезпечують високу інформаційну підтримку виконання завдання і

високий рівень автоматизації керування на всіх етапах польоту. Архітектура САК повинна забезпечувати [2]:

- адаптацію польоту БпЛА до поточних умов функціонування, концентрацію ресурсів для виконання найбільш важливих завдань, перебудовуючи свою структуру;
- введення нових інформаційних каналів з метою адаптації САК до об'єктів різного класу і проведення глибокої модернізації;
- високу інформаційну підтримку під час виконання поставлених завдань і високу автоматизацію керування рухомим об'єктом;
- зниження психологічного навантаження на операторів БАС;
- працездатність за умов ускладнення тактичної обстановки і підвищення динаміки її зміни;
- скорочення часу на прийняття рішень у разі ускладнення вибору варіанту рішення;
- високу експлуатаційну придатність і надійність за низької вартості експлуатації.

Основні якості САК, в свою чергу, практично повністю визначаються бортовою обчислювальною системою, яка, по суті, і є її основою. Постійне зростання складності і кількості завдань, що вирішуються на борту, неминує призводити до ускладнення бортового обладнання і, перш за все, до ускладнення бортової обчислювальної системи, до якої висуваються підвищені вимоги щодо необхідних обчислювальних ресурсів для вирішення завдань орієнтації і навігації.

Актуальним напрямом для інтелектуалізації обчислювальних систем нового покоління, нарівні з нарощуванням обчислювального потенціалу, є розвиток робіт, спрямованих на забезпечення здатності систем керування складними динамічними об'єктами проводити осмислений аналіз, приймати рішення на основі накопичених знань і адаптуватися в заздалегідь непередбачуваних ситуаціях в процесі керування для досягнення поставлених цілей керування [4].

## АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

Після аналізу ряду автопілотів, які є на ринку авіоніки БпЛА, їх можна розподілити на кілька класів [5, 6]:

— «професійні»: «Vector» (UAV Navigation), «Piccolo SL» (Cloud Cap Technology), «MP2x28» (Micropilot), «GNC1000» (Moog Crossbow's), «Kestrel» (Procerus Technologies), «АП-ABIA» (ООО «КБ ABIA»);

— «середнього» класу: «Pixhawk (PX-4)» (3D-robotics), «Naza» (DJI), «YS» (Zero UAV Intelligent Technology), «Panda» (FeiYu Electronic Technology Co).

— «аматорського» рівня: 35x1, 36x1 (UNAV), RVOSD (RangeVideo) тощо.

*Недоліки сучасних автопілотів.* Більшість комерційних автопілотів використовують пропорційно-інтегрально-диференціальні регулятори (ПІД-регулятори). Автопілоти на основі ПІД-регуляторів мають просту конструкцію і легко можуть бути реалізовані для керування БпЛА. Однак ці автопілоти не є оптимальними і мають низьку надійність, не можуть використовуватись для БпЛА військового призначення. Крім того, для де-

яких режимів польоту налаштування параметрів ПД-регулятора може спричиняти серйозні труднощі. Тому нині проводяться активні дослідження із застосування сучасних методів теорії керування для синтезу алгоритмів законів керування БпЛА.

Більшість наявних АП використовують однотипні мікромеханічні і радіоелектронні сенсори, тому якість розв'язання навігаційних завдань залежить від алгоритмів роботи АП, наявності температурної компенсації і якості калібрування давачів. Для того, щоб не залежати від постачання даних від давачів, а також для можливості подальшого розширення функціональності АП, необхідна можливість встановлення декількох типів давачів.

Для динамічних («швидких») БпЛА важлива швидкість реакції АП на мінливу польотну обстановку, тому важливим параметром є частота дискретизації (частота розв'язання завдання керування). Для більшості зазначених АП частота дискретизації не перевищує 200 Гц, хоча деякі АП, такі як «MP2x28», «АП-АВІА», дають можливість встановлювати частоту дискретизації до 400 Гц. Цей параметр безпосередньо пов'язано з частотою оновлення даних давачів та надає можливість додаткового оброблення (наприклад, додаткову фільтрацію) сигналів давачів. Частота дискретизації також залежить від швидкодії (тактової частоти роботи) бортової цифрової обчислювальної машини, яка повинна за один такт дискретизації виконувати всі операції з оброблення сигналів давачів і вироблення сигналів керування.

Сучасний АП повинен мати можливість реалізувати дуже складні і вимогливі до обчислювальної потужності алгоритми оброблення та керування зі значним запасом щодо обчислювальної потужності.

Виконання польотів в складних кліматичних умовах (за температури нижче 0° С і вище +35 °С) можливе лише за наявності термокомпенсації сигналів давачів. Для цього на етапі виробництва треба виконувати температурне калібрування давачів. Розширені діапазони робочої температури мають лише АП професійної серії, наприклад, «MP2x28» і «Kestrel».

## **ВИОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНОЇ ЧАСТИНИ ПРОБЛЕМИ**

Сьогоднішній технологічний розвиток інформаційних технологій вимагає прискореного розвитку теорії інтелектуального керування та теорії системних інформаційних технологій. Нові технології інтелектуального керування вкрай важливі для вирішення проблем сучасної робототехніки, створення бортових і наземних систем керування безпілотними літальними засобами. Крім того, виникає актуальне питання необхідності поєднання таких теорій у єдину концепцію інтелектуалізації інформаційних технологій та створення інтелектуальних технологій керування.

З огляду на перелічені вище недоліки сучасних АП БпЛА постає питання розроблення системи керування БпЛА та проведення ряду заходів щодо забезпечення її інтелектуалізації.



## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для розв'язання завдань керування кутовим рухом і стабілізацією кутового положення безпілотного літального апарату загальний кутовий рух розглядають як суму трьох складників: кутів рискання ( $\psi$ ), тангажу ( $\nu$ ) і крену ( $\gamma$ ). Відповідно до цього поділу формують три канали керування і стабілізації: курсу, тангажу і крену. Розв'язання завдань синтезу і реалізації алгоритмів керування БпЛА має забезпечувати необхідні характеристики руху на різних ділянках траєкторій і режимах польоту [7].

Сучасні автопілоти є комплексом механізмів, які спільно працюють для забезпечення стабілізації БпЛА на траєкторії, стабілізації висоти польоту, керування маневрами БпЛА і приведення його в горизонтальний політ.

В основу схеми автопілотів під час роботи в режимі стабілізації покладено принцип регулювання за кутом, кутової швидкості, а у деяких схемах автопілотів і за кутовим прискоренням. Система БпЛА-автопілот є єдиною замкнутою системою автоматичного керування. Автопілот складається, зазвичай, з трьох автоматичних систем керування з внутрішніми перехресними координаційними зв'язками між каналами автопілота.

Принцип дії традиційних автопілотів оснований на: вимірі відхилення осі літака від заданого просторового положення та перетворенні виміряної величини в команду відхилення керма.

Бажана функціональна залежність між виміряним відхиленням літака і відхиленням керма аналітично виражається законом керування, які є ідеалізованим рівнянням. Ідеалізація полягає в тому, що не враховуються нелінійності і всі ланки вважаються безінерційними. Відповідно до числа органів керування АП має три канали стабілізації, іменовані надалі каналами керма напряму, елеронів і керма висоти.

Закони керування автопілота мають різний вигляд для різних каналів і режимів роботи автопілота.

У режимі стабілізації, коли автопілот підтримує заданий режим польоту, на вхід автопілота надходять сигнали від чутливих елементів:

$$\delta_n = i_\psi \dot{\psi} + \mu_\psi \dot{\psi} + i_\psi \dot{\gamma} ;$$

$$\delta_e = i_\gamma \dot{\gamma} + \mu_\gamma \dot{\gamma} + i_\gamma \dot{\psi} ;$$

$$\delta_v = i_v \dot{\gamma} + \mu_v \dot{\gamma} + i_v |\dot{\gamma}| + K_n \Delta H ,$$

де  $\delta_n$ ,  $\delta_e$ ,  $\delta_v$  — кути відхилення відповідних рулів,  $\Delta H$  — зміна висоти,  $i_\psi$ ,  $i_\gamma$ ,  $i_v$  — передавальні числа по кутах, які визначаються співвідношенням:

$$i = \frac{\delta}{\omega} ,$$

де  $\delta$  — кут повороту руля,  $\omega$  — кутова швидкість літака,  $\mu_\psi$ ,  $\mu_\gamma$ ,  $\mu_v$  — передавальні числа по кутовим швидкостям, які визначаються співвідношенням:

$$\mu = \frac{\delta}{\psi, \gamma, \nu},$$

де  $\psi$  — кут курсу літака,  $\gamma$  — кут крену літака,  $\nu$  — кут тангажу літака,  $i_{\psi\gamma}$  — передавальне число за курсом від крену,  $i_{\gamma\nu}$  — передавальне число за креном від курсу,  $i_{\nu\gamma}$  — передавальне число за тангажем від крену,  $K_{\eta}$  — передавальне число за зміною висоти.

Оптимальні значення передавальних чисел залежать від характеристик БпЛА, а отже, і від режиму польоту. Однак, через складність перебудови передавальних чисел в польоті на практиці обмежуються "середніми" значеннями передавальних чисел, які встановлюють під час наземного регулювання автопілота. Ці значення визначають розрахунковим шляхом для основного режиму польоту і уточнюють під час льотних випробувань, досягаючи задовільної якості перехідних процесів на всьому діапазоні висот і швидкостей, тобто ні на одному з етапів польоту вони не будуть мати оптимальних значень. Швидкість протікання перехідних процесів в системі керування БпЛА і взаємозв'язок руху БпЛА відносно головних осей інерції призводять до виникнення складних перехресних зв'язків між каналами автопілота.

Тому актуальним є розроблення алгоритмів адаптивного керування орієнтацією БпЛА, які компенсують перехресні зв'язки та взаємний вплив поміж каналами керування, що забезпечує інваріантність генерованих команд керування по всіх каналах, навіть у разі глибокого маневрування БпЛА. Окрім того, алгоритми керування повинні забезпечити підвищення якості і стійкості керування за умови реалізації складних просторових траєкторій польоту з великими змінами висоти та швидкості польоту за наявності істотно криволінійних ділянок маневрування у вертикальній і горизонтальній площинах.

**Мета статті** — дослідження сучасних систем автоматичного керування БпЛА та опис нових методів їх інтелектуалізації.

## ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ

Сучасний шлях розвитку бортових систем керування БпЛА передбачає імплементацію алгоритмів керування за допомоги функціонально-програмних модулів, написаних сучасними мовами програмування високого рівня в обчислювальному середовищі на базі мікропроцесорів, з обчислювальною потужністю, достатньою для реалізації цих алгоритмів у вигляді єдиного апаратно-програмного комплексу інтегрованої авіоніки.

Функціонально-програмні модулі для АП сучасного БпЛА — це модулі керування та навігації, які забезпечують точне керування БпЛА оператором і роблять можливим виконання польоту в автоматичному режимі від зльоту до посадки. Необхідним базовим набором програмних модулів для АП сучасного БпЛА є такий: три контури автопілота для стабілізації кутового положення (канал крену, тангажу, ристання), система керування висотою і швидкістю польоту, система траєкторного керування БпЛА. Така структура апаратно-програмного комплексу багато в чому схожа з сучасним пілотажно-навігаційним обладнанням повітряних суден, яке базується

на широкому використанні цифрових обчислювальних машин і створених на їх базі багатомашинних обчислювальних систем у складі електродистанційної системи керування — ЕДСК, системи автоматичного керування — САК, обчислювальної системи літаководіння — ОСЛ. Їхнє призначення та принцип роботи схожий з запропонованою бортовою системою керування, яка реалізує перспективний напрямок розвитку систем керування БпЛА.

Отже, використання інтегрованої авіоніки дозволяє перенести більшість функцій керування БпЛА на рівень програмного забезпечення, виконаного у вигляді окремих функціонально-програмних модулів, які використовують для керування БпЛА на всіх режимах, наприклад, політ заданим маршрутом, автосупровід цілей, повернення до точки запуску, політ на заданій швидкості, політ на заданій висоті, стабілізація кутів орієнтації БпЛА тощо.

Функціональна структура апаратно-програмного комплексу системи керування БпЛА (рис.1), реалізованого засобами інтегрованої авіоніки, як правило, включає джерела даних, в якості яких використовують інерційні давачі вимірювання прискорень і кутових швидкостей, магнітні давачі, давачі температури, давачі тиску, GPS-приймач, а також давачі висоти і повітряної швидкості. Отримані дані передаються в програмно-апаратний комплекс бортової системи керування, де оцінюються параметри руху БпЛА і виробляються керуючі впливи, які надходять на сервоприводи системи керування польотом БпЛА.

Центральним модулем програмно-апаратного комплексу бортової системи керування БпЛА є функціонально-програмний модуль автопілота, який забезпечує керування кутами орієнтації БпЛА.

Здебільшого випадків траєкторії польоту БпЛА є просторовими кривими з великими змінами висоти і швидкості польоту, які також включають істотно криволінійні ділянки маневрування у вертикальній і горизонтальній площинах. Під час руху БпЛА за такими траєкторіями функціонально-програмний модуль автопілота БпЛА повинен забезпечувати високу динамічну точність реалізації цих траєкторій [8].

Поставлена мета зазвичай досягається за рахунок введення у функціонально-програмний модуль автопілота перехресних зв'язків між каналами системи керування БпЛА з синхронною адаптацією коефіцієнтів, які входять у алгоритми системи керування БпЛА в залежності від величини швидкісного напору, який залежить від висоти і швидкості польоту і є переважним фактором зміни динамічних властивостей БпЛА [9].

*Функціональна структура розроблених алгоритмів програмної реалізації керування кутовим положенням безпілотного літального апарата.* Функціонально-програмний модуль автопілота кутової стабілізації складається з трьох контролерів кутів рискання ( $\psi$ ), крену ( $\gamma$ ) і тангажу ( $\nu$ ) з внутрішніми перехресними зв'язками, які забезпечують керування кутами орієнтації БпЛА.

Основою роботи алгоритмів функціонально-програмного модуля автопілота є сигнали інерційних давачів вимірювання прискорень ( $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$ ) і кутових швидкостей ( $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$ ) по осях системи координат  $S_{xyz}$  відповідно, давача температури ( $T$ ), давача тиску ( $p$ ), давача повітряної швидкості ( $V_a$ ).

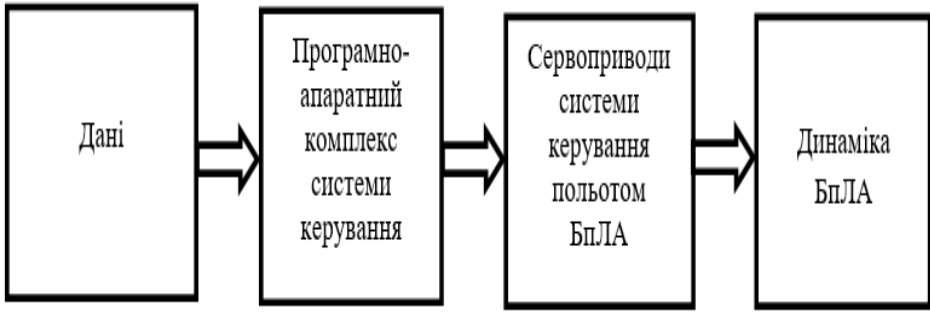


Рис. 1. Функціональна структура апаратно-програмного комплексу системи керування БПЛА

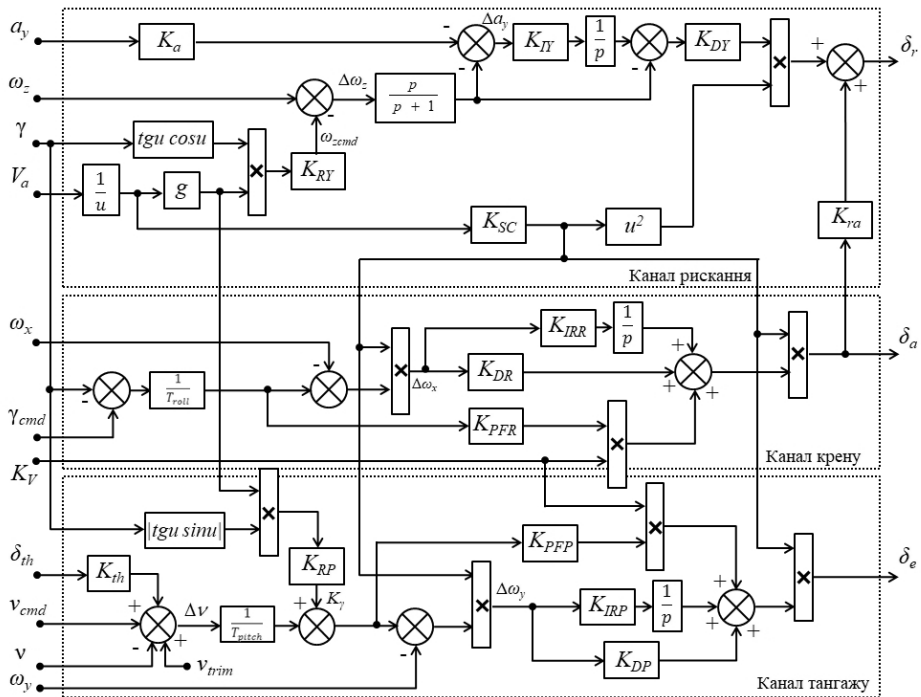


Рис. 2. Структурна схема системи керування кутовим положенням БПЛА

За цими сигналами давачів у функціонально-програмному модулі автотімота формуються команди керування кермом напрямку ( $\delta_r$ ), кермом висоти ( $\delta_e$ ), елеронами ( $\delta_a$ ) і дроселем ( $\delta_{th}$ ) (рис.2).

За поточними значеннями помилки бокового прискорення ( $\Delta a_y$ ) і помилки кутової швидкості координованого розвороту ( $\Delta\omega_z$ ) формується команда керування відхиленням керма напрямку  $\delta_r$  за таким алгоритмом:

$$\delta_r = K_{DY}(W_{IY}(p)\Delta a_y - W_{FY}(p)\Delta \omega_z) \frac{K_{SC}^2}{V_a^2} + K_{ra}\delta_a,$$

де  $K_{DY}$  — передавальне число демпфера рискання;  $K_{ra}$  — передавальне число перехресного зв'язку відхилення керма на пряму за відхиленням елеронів;  $K_{SC}$  — коефіцієнт масштабування ефективності дії рулів залежно від швидкості польоту;  $K_{IY}$  — передавальне число інтегратора в каналі рискання;  $W_{IY}(p) = \frac{K_{IY}}{p}$  — передавальна функція інтегратора в каналі рискання.

За поточним значенням помилки кутової швидкості в каналі крену ( $\Delta \omega_x$ ) формується команда керування відхиленням елеронів ( $\delta_a$ ) за таким алгоритмом:

$$\delta_a = (\Delta \omega_x K_{DR} + \frac{\gamma_{cmd} - \gamma}{T_{roll}} K_{PFR} K_V + W_{IR}(p) \Delta \omega_x) \frac{K_{SC}}{V_a},$$

$$W_{IR}(p) = \frac{K_{IRR}}{p}, \quad K_V = \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}},$$

де  $K_{PR}$ ,  $K_{DR}$ ,  $K_{IR}$  — передавальні числа пропорційної ланки, демпфера і інтегратора ПД-регулятора в каналі крену відповідно;  $W_{IR}(p)$  — передавальна функція інтегратора в каналі крену;  $K_V$  — поправка на відмінність фактичної щільності навколишнього повітря від стандартної у разі перерахунку індикаторної швидкості в істинну;  $\rho$ ,  $\rho_0$  — щільність повітря на поточній висоті польоту і на рівні моря відповідно.

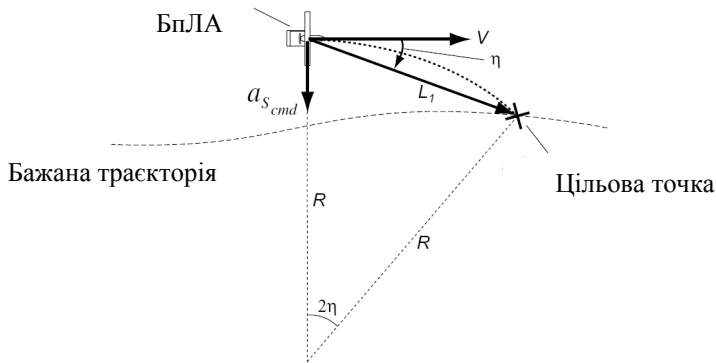
За поточними значеннями величини компенсації впливу крену на тангаж ( $K_\gamma$ ) і помилки кутової швидкості в каналі тангажу ( $\Delta \omega_y$ ) формується команда керування відхиленням керма висоти ( $\delta_e$ ) за таким алгоритмом:

$$\delta_e = (\Delta \omega_y K_{DP} + (\frac{\Delta v}{T_{pitch}} + K_\gamma) K_{PFP} K_V + W_{IP}(p) \Delta \omega_y) \frac{K_{SC}}{V_a},$$

де  $K_{PP}$ ,  $K_{DP}$ ,  $K_{IP}$  — передавальні числа пропорційної ланки, демпфера і інтегратора ПД-регулятора в каналі тангажу відповідно;  $W_{IP}(p) = \frac{K_{IRP}}{p}$  —

передавальна функція інтегратора в каналі тангажу.

*Функціональна структура розробленого алгоритму програмної реалізації адаптивного керування кутом крену безпілотного літального апарата.* Метою траєкторного керування БпЛА є формування керуючого сигналу крену за умови автоматичного керування польотом БпЛА, для чого була розроблена логіка навігації БпЛА на основі адаптивного керування кутом крену [8]. За логікою роботи алгоритму вибирається опорна цільова точка (L) на бажаній траєкторії і генерується командний кут крену ( $\gamma_{cmd}$ ) з використанням розрахованого бокового прискорення ( $A_{lat}$ ) для польоту в опорну точку (рис. 3).



**Рис. 3.** Схема роботи алгоритму адаптивного керування кутом крену БПЛА

Використовуючи значення  $A_{lat}$ , алгоритм формує команду крену в градусах для польоту до цільової точки L:

$$\gamma_{cmd} = \arctan\left(\frac{A_{lat}}{g}\right),$$

де  $g$  — прискорення вільного падіння.

Функціональна структура розробленого алгоритму програмної реалізації керування висотою і швидкістю польоту безпілотного літального апарата, на основі загальної концепції керування повною енергією. У цьому випадку завдання керування польотом БПЛА у вертикальній площині ставиться не як завдання керування висотою і швидкістю, а формулюється як задача керування повною енергією ( $E$ ) з урахуванням обмежень на розподіл її складників і забезпеченням контролю і захисту від виходу параметрів польоту за допустимі межі.

Основа методології передбачає керування повною енергією БПЛА, яка включає в себе потенційну енергію і кінетичну енергію:

$$E = mgH + \frac{1}{2}mV^2,$$

де  $m$  — маса БПЛА,  $H$  — висота польоту,  $g$  — прискорення сили тяжіння,  $V$  — повітряна швидкість.

На БПЛА єдиною керованою змінною, що впливає на енергію, є тяга. Відхилення керма висоти призводить лише до перерозподілу потенційної і кінетичної складових. Алгоритм системи — це два паралельних процеси формування команд керування, на виході яких визначаються сигнали командного кута тангажу і тяги.

Робота алгоритму базується на таких даних: задана висота польоту БПЛА ( $H_c$ ), поточна висота ( $H$ ), задана повітряна швидкість ( $V_c$ ), поточна повітряна швидкість ( $V$ ), задане і поточне прискорення ( $\dot{V}_c$  і  $\dot{V}$  відповідно), задана і поточна вертикальна швидкість ( $\dot{H}_c$  і  $\dot{H}$  відповідно), номінальна тяга ( $T_{nominal}$ ) і кут крену ( $\gamma$ ). За цими сигналами в функціонально-

програмному модулі формуються команди керування кутом тангажу ( $v_{cmd}$ ) і тягою двигуна ( $\delta_{th}$ ).

Необхідна тяга розраховується за формулою:

$$\delta_{th} = (E_{SE} + \dot{E}_{SE} K_{damp}) K_{thr} + T_{ff} + \frac{E_{SE} K_i}{p},$$

де  $E_{SE}$  — помилка питомої енергії;  $\dot{E}_{SE}$  — похідна помилки повної енергії;  $T_{ff}$ , — тяга, яка необхідна для реалізації попереджувального керування;  $K_{thr}$ ,  $K_{damp}$ ,  $K_i$  — передавальні числа пропорційної ланки, демпфера і інтегратора ПД-регулятора в каналі керування тягою двигуна.

Командний кут тангажу, який залежить від сигналів балансу розподілу енергії, розраховується за формулою:

$$v_{cmd} = \frac{temp + \frac{B_{SE} K_{int}}{p}}{gainInv},$$

де  $gainInv$  і  $temp$  — допоміжні параметри, які пов'язано з повітряною швидкістю і використовуються для поліпшення роботи інтегратора під час польоту в турбулентній атмосфері;  $B_{SE}$  — помилка необхідного балансу питомої енергії

БПЛА;  $\frac{K_{int}}{p}$  — передавальна функція інтегратора в каналі тангажу.

Основними відмінностями і перевагами розробленого автопілота від традиційного автопілота є:

- розвинені перехресні координаційні зв'язки по каналах керування АП;
- наявність в законах керування по трьох каналах сигналів повітряної швидкості польоту БПЛА і щільності повітря (швидкісний напір);
- наявність компенсації ковзання за даними акселерометра;
- наявність в каналі тангажу сигналу  $\delta_{th}$ , який є необхідним для реалізації алгоритму одночасного керування тангажем і швидкістю польоту;
- можливість забезпечення координованого розвороту за рахунок введення в канал рискання і тангажу сигналів від кута крену.

*Розроблення методів інтелектуалізації системи керування БПЛА.* Для розширення діапазону функціональних можливостей САК пропонується доповнити розроблені канали та алгоритми керування автопілота такими компонентами [10, 11]:

- інтелектуалізований канал траєкторного керування, який забезпечує обчислення і виконання траєкторії польоту за закладеними координатами з урахуванням необхідних критеріїв оптимальності;
- канал інваріантного керування, який забезпечує роботу автопілота за умов глибокого динамічного маневрування у разі виникнення складних обмежень під час виконання траєкторії польоту;
- модуль адаптивного керування, який забезпечує роботу і оновлення бази даних траєкторного керування, що спрямовано на прискорене визначення траєкторії польоту за штатних умов;

— модуль генерації віртуальних асинхронних циклів інформаційних даних, спрямований на підвищення обчислювальних можливостей всієї системи автоматичного керування для забезпечення її роботи в масштабі реального часу;

— модуль математичної (аеродинамічної) моделі БпЛА, модуль моделі навігаційної системи, модуль моделі навколишнього середовища і атмосфери, які забезпечують обчислення еталонних польотних даних для подальшого порівняння з поточними реальними параметрами польоту і визначення навігаційних помилок і похибок у відпрацюванні розрахованої траєкторії польоту з метою їх компенсації і підвищення точності керування;

— канал автономної навігації, який забезпечує повноцінну роботу системи автоматичного керування та виконання поставленого завдання у разі повної втрати зв'язку з наземним командним центром і навігаційною системою.

## **ВИСНОВКИ**

Проведені дослідження довели недостатню ефективність функціонування традиційних ПІД-регуляторів у структурі систем керування БпЛА за наявності зовнішніх збурень та у разі глибокого маневрування БпЛА. Саме тому синтезовано нову трирівневу систему автоматичного керування, засновану на принципах інваріантності, адаптивності і автономності.

Результати моделювань підтвердили суттєві переваги синтезованої системи автоматичного керування БпЛА, структура якої складається з таких рівнів:

- рівень керування орієнтацією безпілотної літальної апаратури;
- рівень керування повною енергією безпілотної літальної апаратури;
- рівень траєкторного керування рухом безпілотної літальної апаратури.

Застосування методу керування повною енергією спрямовано на розв'язання завдань керування швидкістю та висотою польоту на основі балансу повної енергії для безпілотної літальної апаратури з істотно нелінійною аеродинамікою. До таких задач належить, наприклад, керування зльотом та посадкою цього апаратури, оптимізація траєкторії польоту за різними критеріями, керування швидкістю набору висоти та багато інших. Переваги законів керування за енергетичним методом перед традиційними системами керування висотою і швидкістю польоту зумовлені інваріантністю до зовнішніх збурень, викликаними турбулентністю атмосфери, а також компенсацією перехресних зв'язків, які виникають між каналами керування висотою та швидкістю польоту безпілотної літальної апаратури, шляхом мінімізації відхилення повної енергії його руху від опорного значення і мінімізації дисбалансу між кінетичною і потенційною складовими енергії руху безпілотної літальної апаратури.

Для формування сигналів керування траєкторним рухом безпілотної літальної апаратури розроблено систему навігації, яка базується на методі нелінійної логіки адаптивного керування траєкторним рухом. Використання цього методу в системі навігації забезпечує більшу точність і сталість процесу керування траєкторним рухом безпілотної літальної апаратури в порівнянні з застосуванням пропорційно-інтегрально-диференціальних регуляторів. Крім того, розроблена система траєкторного керування рухом безпілотної літальної апаратури забезпечує інваріантність до зовнішніх збурень за рахунок



компенсаційних зв'язків і швидкого відгуку цієї системи на наявні збурення, що в свою чергу підвищує якість траєкторного керування рухом цього апарата. Таким чином, розроблена система траєкторного керування рухом безпілотного літального апарата завжди зберігає однакові радіуси при обльоті маршпутних точок і забезпечує високу точність руху по маршруту.

Розроблені закони адаптивного керування рухом безпілотного літального апарата синтезовано на основі методів нелінійної інваріантності та автономності. Ці закони відповідають вимогам оптимальних гібридних систем і дають можливість керування безпілотними літальними апаратами в умовах, коли їх рух описується істотно нелінійними динамічними системами рівнянь.

Доповнення розроблених каналів та алгоритмів керування безпілотним літальним апаратом запропонованими методами інтелектуалізації системи керування надасть змогу розширити діапазон функціональних можливостей системи автоматичного керування та забезпечити автономну навігацію безпілотного літального апарата.

Об'єднання розроблених законів керування в єдиний апаратно-програмний комплекс інтегрованої авіоніки та доповнення їх запропонованими компонентами інтелектуалізації створить ефект синергії та забезпечить ефективність і сталість процесу керування рухом безпілотного літального апарата.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / Под ред.: М.Н. Красильщикова, Г.Г. Серебрякова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 556 с.
2. Харченко В.П., Чепіженко В.І., Тунік А.А., Павлова С.В. Авіоніка безпілотних літальних апаратів. Київ: ТОВ «Абрис-принт», 2012. 464 с.
3. Федосов Е.А., Бобронников В.Т., Кухтенко В.И. Динамическое проектирование систем управления автоматических маневренных летательных аппаратов. Москва: Машиностроение, 1997. 336 с.
4. Pavlova S., Komar M. The Invariant Adaptation of the Aircraft Control System in Emergency Situation During the Flight. Proceeding of the National Aviation University. 2016. № 4(69). P. 28–33.
5. Fahlstrom P., Gleason T. Introduction to UAV systems. Hoboken: Wiley, 2012. 4th ed. 308 p.
6. Кортунов В.И., Мазуренко А.В., Али Хусейн Ватик Мухаммед. Средства управления мини и микро-БПЛА. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2016. № 1. С. 45–55.
7. Austin R. Unmanned aircraft systems. UAVs design, development and deployment. John Wiley & Sons, 2010. 372 p.
8. Рэндал У. Биард, Тимоти У. МакЛэйн. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика. Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2015. 312 с.
9. Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии. / Под ред. Б.С. Алешина. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 424 с.
10. Волков А.Е., Павлова С.В. Моделирование инвариантного метода разрешения динамических конфликтов воздушных судов. *Кибернетика и системный анализ*. 2017. вып. 53 (4). С. 105–112.
11. Волошенюк Д.А., Павлова С.В. Керування посадкою літаків в умовах підвищення інтенсивності повітряного руху. *Управляющие системы и машины*. 2017. вып. 5. С. 62–74.

Отримано 27.12.2017

## REFERENCES

1. Krasil'shchikov M.N., Serebryakov G.G. Modern information technologies in the tasks of navigation and guidance of unmanned maneuverable aircrafts. Moscow: FIZMATLIT, 2009. 556 p. (in Russian).
2. Kharchenko V.P., Chepizhenko V.I., Tunik A.A., Pavlova S.V. Avionics of unmanned aerial vehicles. Kyiv: Abris-Print, 2012. 464 p. (in Ukrainian)
3. Fedosov E.A., Bobronnikov V.T., Kukhtenko V.I. Dynamic design of control systems for automatic maneuverable aircrafts. Moscow: Mashinostroyeniye, 1997. 336 p. (In Russian).
4. Pavlova S., Komar M. The Invariant Adaptation of the Aircraft Control System in Emergency Situation During the Flight. *Proceedings of the National Aviation University*. 2016. № 4(69). P. 28–33.
5. Fahlstrom P., Gleason T. Introduction to UAV systems. Hoboken: Wiley, 2012. 4th ed. 308 p.
6. Kortunov V.I., Mazurenko A.V., Ali Hussein V. Control of mini and micro-UAVs. *Radiotelectronic and computer systems*. 2016. № 1. P. 45–55 (In Russian).
7. Austin R. Unmanned aircraft systems. UAV design, development and deployment. John Wiley & Sons, 2010. 372 p.
8. Randal W. Beard, Timothy W. McLaine Small unmanned aerial vehicles: theory and practice. Moscow: TEKHNO SFERA, 2015. 312 c.
9. Alyoshin B.S. Orientation and navigation of mobile objects: modern information technologies. Moscow: FIZMATLIT, 2006. 424 p. (In Russian).
10. Volkov A.E., Pavlova S.V. Modeling of the invariant method for resolving the dynamic conflicts of aircraft. *Cybernetics and systems analysis*. 2017. № 53 (4). P. 105–112 (In Russian).
11. Voloshenyuk D.A., Pavlova S.V. Management of aircraft landing in conditions of increasing air traffic. *Control systems and machines*. 2017 № 5. P. 62–74 (In Russian).

Received 27.12.2017

*В.И. Гриценко*, член-корреспондент НАН Украины, директор

Международного научно-учебного центра

информационных технологий и систем

НАН Украины и МОН Украины

e-mail: vig@irtc.org.ua

*А.Е. Волков*, старш. науч. сотр.,

отд. интеллектуального управления

e-mail: alexvolk@ukr.net

*Н.Н. Комар*, науч. сотр.,

отд. интеллектуального управления

e-mail: nickkomar08@gmail.com

*Ю.П. Богачук*, канд. техн. наук, старш. науч. сотр.,

отд. интеллектуального управления

e-mail: dep185@irtc.org.ua

Международного научно-учебного центра

информационных технологий и систем

НАН Украины и МОН Украины

пр. Акад. Глушкова 40, корп. 4/1, 03187, Киев, Украина

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

Рассмотрен вопрос необходимости создания новой перспективной системы управления беспилотными летательными аппаратами и разработки методов ее интеллектуализации. Предложены идеи применения теории инвариантности и автономности для синтеза перспективных систем управления, а также ряд методов для обеспечения высокого уровня их интеллектуализации. Предложен подход к решению задачи основанный на

теории высокоточного дистанционного управления динамическими объектами, а также на комплексном взаимодействии методов теории автономности, адаптивного управления и интеллектуализации процессов управления динамическими объектами.

**Ключевые слова:** *беспилотный летательный аппарат, система управления, инвариантность, интеллектуализация, автономность.*

*V.I. Gritsenko*, Corresponding Member of NAS of Ukraine,  
Director of International Research and Training  
Center for Information Technologies and Systems  
of the National Academy of Sciences of Ukraine  
and Ministry of Education and Science of Ukraine  
e-mail: vig@irtc.org.ua  
*O.Ye. Volkov*, Senior Researcher,  
Intellectual Control Department  
e-mail: alexvolk@ukr.net  
*M.M. Komar*, Researcher,  
Intellectual Control Department  
e-mail: nickkomar08@gmail.com  
*Yu.P. Bogachuk*, PhD (Engineering), Senior Researcher,  
Intellectual Control Department  
e-mail: dep185@irtc.org.ua  
International Research and Training Center for Information  
Technologies and Systems of the National Academy  
of Sciences of Ukraine and Ministry of Education and Science of Ukraine,  
40, Acad. Glushkov av., 03187, Kiev, Ukraine

#### INTELLECTUALIZATION OF MODERN SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

**Introduction.** The article discusses the actual questions of the need of creation of modern systems of automatic control of unmanned aerial vehicle (UAV) and describes new methods of its intellectualization. Today's development of information technology requires accelerated development of the theory of intellectual control and the theory of systemic information technology. New technologies of intellectual control are extremely important for solving the problems of modern unmanned aviation.

**The purpose** of the article is to solve the issues of the development of the control system of UAV and to provide a number of measures aimed to ensuring its intellectualization. The approach considered in the article is based on the theory of high-precision remote control of dynamic objects and on the complex interaction of methods of theory of invariance, adaptive control and intellectualization of processes of UAV control.

**Results.** The development and implementation of control algorithms using functional program modules written in modern high-level programming languages in the computer environment based on microprocessors with a computing power sufficient to implement these algorithms in the form of a unified hardware and software complex of the integrated avionics.

The expansion of the range of functional capabilities of UAV control system that is offered to supplement the developed channels and algorithms of autopilot by the methods of intellectualization.

**Conclusions.** It is shown that combining the developed control laws for UAV autopilot into a unified hardware and software complex of integrated avionics and supplementing them with the proposed components of intellectualization will create a synergy effect and ensure the effectiveness and sustainability of the process of controlling the motion of the UAV.

**Keywords:** *unmanned aerial vehicle, control system, invariance, intellectualization, autonomous.*

DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt191.01.060>

UDC 004.9

**M.V. BACHYNSKYY**, PhD (Engineering), Docent,

Docent of Biotechnical Chair

e-mail: [m\\_bachynskiy@ukr.net](mailto:m_bachynskiy@ukr.net)

**B.I. YAVORSKYY**, Dr. (Engineering), Professor,

Professor of Biotechnical Chair

e-mail: [biotehnic0@gmail.com](mailto:biotehnic0@gmail.com)

Ivan Puluji Ternopil National Technical University,

Rus'ka av., 56, Ternopil, 46001, Ukraine

## INFORMATIONAL ASPECTS OF THE HAPTIC STIMULATION BY THE LIGHT FOR CORRECTION OF THE HUMAN' STATE

---

**Introduction.** *The study of the laws and principles of information processes in the biological systems of the human body in extreme forms of its activities and the development of the theory of medical information systems of such appointment, taking into account the status and trends of convergence of society, ecosystems and technology become very relevant. This state of affairs makes it possible to affirm that it is an actual scientific and applied problem of radical change of the existing paradigm of designing information systems.*

**The purpose** of the article is to specify the informational aspects of low intensity, haptic stimulation by the light, which is essential for correction of the functional state of an organism of the human being, who works in extreme conditions, to develop and study such methods and systems.

**Methods.** *Analyses of requirements, functions and systems for designing synthesis of information technologies and the control biotechnical system of correction of the functional state of an organism of the human, who works in extreme conditions. The theoretical and experimental dependences between the stimulation energy of light emission diode (LED) and the energy are transferred through the layered bio media design. Mathematical modelling and computational simulation. Comparison of these real and model data.*

**Results.** *The base aspects requirements, functions and systems for designing synthesis of information technologies and the control biotechnical system of correction of the functional state of an organism of the human, who works in extreme conditions, low intensity, haptic stimulation by the light are defined. The methods for determining of intensity  $I_0$  of light emission diode, recursive expression  $I_m = C_m I_{m-1}$ ,  $m = \overline{1, M}$  and formula for coefficient  $C_m$ , where  $M$  — quantity of bio media layers were developed. The bridges, which connects Maxwell's phenomenological theory with the atomistic theory of matter and optics, were used.*

*Computer simulation studies have confirmed the specification of requirements, functional and structural schemas of biotechnical system.*

© M.V. BACHYNSKYY, B.I. YAVORSKYY, 2018

**Conclusions.** *Thanking to specification of requirements possibility-using recursive determining of the light flux intensity after every bio media layer was got. Under the effect of recursion low computation complexity was caused. Information technology means (for automation optimal control) of the human state under external influences on the organism was developed. Further study to confirm statistical significance in representative samples of observations was opened.*

**Keywords:** *haptic stimulate, light, information biotechnical system.*

## **INTRODUCTION**

The study of the laws and principles of information processes in the medical and biological systems of the human body in extreme forms of its activities and the development of the theory of medical information systems of such appointment, taking into account the state and trends of convergence of society, ecosystems and technology, becomes very relevant [1]. Solving the problems of prevention, diagnosis, correction and rehabilitation of a person's condition appears to be necessary because of the conditions of its activity [2]. At the same time, information technologies are increasingly gaining importance in solving the problems of collecting, storing, processing and transmitting information and research, modeling, diagnosis, forecasting and correction of the functional state of biological and medical systems of human under extreme conditions. In existing medical information systems, electromagnetic radiation [3] is used for obtaining information from a bioobject and for correction of its state including optical range [4]. Effective in terms of the complexity of managing radiation characteristics are its semiconductor sources [5], but for use in information technology, they are not intended and are investigated only in the direction of increasing the efficiency of converting electricity into radiation energy. The processes of radiation by the source, its propagation to the bioobject, the interaction with the bio-environment are presented in the framework of mathematical models [6], which are used in phototherapy systems, visualization of the results of biomedical research in diagnostics. They do not properly take into account: a) the physical and biological properties of the bioobject as a medium for the transmission of information by radiation; b) own bioelectric activity of organs and tissues; c) basic informational aspects; d) criterion of optimality in the sense of the theory of biosystems.

The optimal solution of each application based on mathematical models, including informational, functional, structural, logical and heuristic, algorithmic modeling of processes in a living organism in norm in extreme conditions. These requires a common theoretical basis, new formulation and solution of a number of tasks of a systemic nature. These are: a) inclusion in the medical information system and information technologies of obtaining, storing, transmitting and analyzing medical and biological information of different levels of organization of information processes in physiological effects, that arise when radiation characteristics are different; b) identification and construction of appropriate metrological norms of radiation, and reactions to its biological objects; c) definition of conceptual foundations for formulating tasks of synthesis of structures and functions of information systems and technologies based on wave and quantum concepts; d) construction of methods for the study of information

processes and management processes in biological and medical systems with the help of intelligent information technologies; e) verification of information and mathematical modeling of medical, biological and biotechnical systems for monitoring and correction of the organism, which is in extreme conditions. This state of affairs makes it possible to affirm that it is an actual scientific and applied problem of change of the existing paradigm of designing information systems, which is essential for informative light correction of the functional state of an organism of the human being, who works in extreme conditions.

## **INTRACEPTION AND HAPTIC INFORMATIVE SENSORY FUNCTION**

The contradiction between the data on interoception and the concepts of psychophysics (i.e., the sensory function was associated with a sensation, that arises when stimulating the receptor) recently had been stated [7, 8]. Later is stated, that interoceptive stimuli do not cause sensations [9]. A reliable evaluation of the interoceptive function was only possible after the development of electrophysiological method and the appearance of the method of conditioned reflexes. In our time, the interoceptive system is considered as an afferent link in the autonomic nervous system. Interoceptors mostly represent diffuse structures; they are similar to the skin receptors. The afferent pathways coming from these receptors are much more complex. Most of the impulses come from the visceral receptors to the central nervous system.

Most afferent interoceptive impulses come to the thalamic nucleus of the item ventralis posterior, that is an important switching station. Cortical representation of interoception can be found in the sensorimotor cortex, as well as in the limbic region located on the medial, latent surface of the cerebral hemispheres. The presence of this central representation makes it possible to understand why interoceptive stimuli, without causing sensations, nevertheless often affect the behavior of humans.

Interoceptors of all types perform two main functions: first, they constitute afferent link of special vegetative reflexes, which play an important role in maintaining homeostasis in the body; secondly, by sending information on the state of internal organs, they affect the state of the central nervous system. Impulses from these receptors have a profound effect on a higher nervous activity. The specificity of interoceptors with respect to different types of physical energy is challenged.

It is proved that interoceptive information is transmitted by the frequency code, some regularities of such a transmission were established, a correlation between the intensity of the stimulus and the frequency of impulses diverted from the nerve was found. To study afferentiation simultaneously recorded EEG. Traced changes were caused by desynchronization of the EEG (the alpha resting rhythm). It was also possible to remove the evoked potentials from certain areas of the cortex. At the same time, these painless irritations did not cause any sensations. This shows that interoceptive impulses do indeed reach the brain and alter the electrical activity of some cortical neurons.

Two types of afferent nerve mechanisms began to be distinguished, namely, conscious and unconscious activity. It is possible to postulate that in humans interoceptive impulses remain in the sphere of the unconscious. Now we do not have any data on the decoding mechanism in the brain responsible for the un-

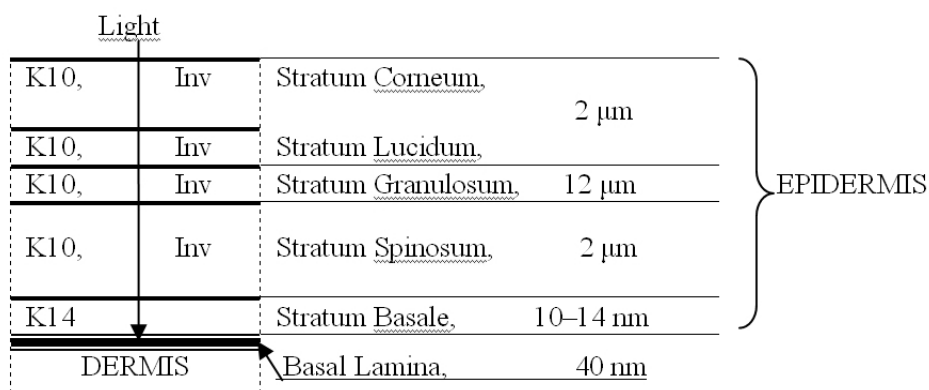
conscious integration of a huge mass of impulses and the transformation of unconscious signals into conscious information.

Sensory receptors are found all over the body including the skin. Senses are sometimes referred with the understanding that includes the sense of touch (e.g., by the stick), proprioception, and haptic perception. The concept of haptic perception is related to the concept of extended physiological proprioception, according to which when a tool such as a stick is used [10]. Haptic perception relies on the forces experienced during touch. Such force also arises under the influence of light. Then the light is used for the transmission and identification of information, manipulation of biological substances, in fundamental research (obtaining by the influence of light and numerical analysis of the response of the cell by a chemical or thermal gradient), etc. [11].

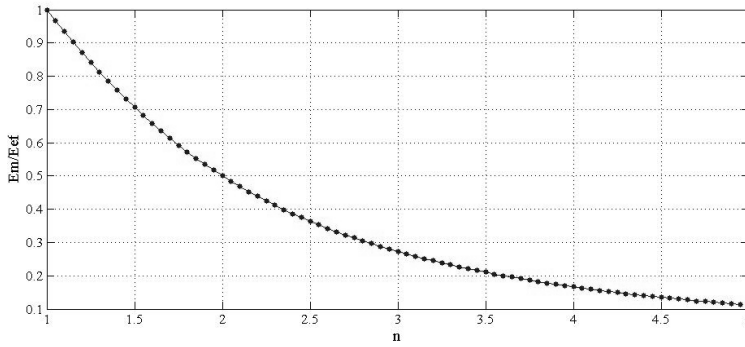
## THE RECEPTORS OF STIMULATING LIGHT

Light penetrated into the organism through eyes, and through the skin — with attenuation down to 1% occurs for wavelengths of (250-280) nm at around 40  $\mu\text{m}$  depth, and for (300-1.2 $\cdot 10^5$ ) nm at (100-800)  $\mu\text{m}$  [12].

The skin consists of three main layers: the epidermis, dermis and hypoderm [13]. The derma is a layer of skin under the epidermis and closely linked to it by the basal (B) membrane (SB, Fig. 1). There are many specific nerve endings in the dermis, which provide a sense of temperature, touch, pressure, vibration and tissue damage. The non-specificity of the receptors was found to be able to react, including light [9], in particular, the sensory receptors of the autonomic nervous system neurons [11, 14]. These processes cause nociception. Determining the effect of the epidermis on the transfer of light to the dermis is important for optimizing the means of light stimulation to increase its efficiency.



**Fig. 1.** Scheme of light propagation to dermis. K10, K14 — keratin, Inv — involucrin, a component of the skin, forms the shell of keratin cells



**Fig. 2.** Graphic of the ratio of the measured and effective strength of the electric field of light on the refractive index  $n$  of the medium

In the optical range, the dielectric function of the epidermis and basal is related to the refractive index and the absorption coefficient of light [6]:

$$\varepsilon(\omega) = (n + i\kappa)^2, \quad (1)$$

where  $\varepsilon(\omega)$  — dielectric function,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  — frequency,  $n$  — refractive index,  $\kappa$  — absorption coefficient,  $i = \sqrt{-1}$  [6].

The restrictions on the possible values of the real and imaginary components of the dielectric constant are given by the Kramers-Kronig equations used to reproduce dielectric constant from the values of  $n$  and  $\kappa$ . The dielectric properties of the epidermis for the frequency range  $(3.75 - 7.5) \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$  are given, for example, in [15], where  $n \approx 1.5$ .

The valid combination of the phenomenological theory of Maxwell with the atomic theory of matter obtained the bridges: a) between the effective strength and polarization of the medium; b) the effective strength, polarization of the medium, and measured strength [6] (Fig. 2.):

$$\text{a) } N\alpha E_{ef} = P, \quad \text{b) } E_{ef} = E_m + \frac{4\pi}{3}P, \quad (2)$$

where  $N$  — the number of molecules per unit volume,  $\alpha = \frac{3}{4\pi N} \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2}$  — representing the mean polarizability,  $E_{ef}$  — effective field of dimensions  $[\text{EL}^{-2}]$ ,  $P$  — the total electric moment per unit volume ( $e$  — charge,  $l$  — length of dipole  $p = el$ , and since  $p$  is of dimensions  $[\text{EL}]$ ,  $\alpha$  is seen to have the dimensions  $[\text{L}^{-3}]$ , i.e. those of a volume),  $E_m$  — measured strength [6]. From expressions (2), the dependence on the refractive index  $n$  of the relative values of these characteristics, in particular, the ratio (3):

$$\frac{E_m}{E_{ef}} = \frac{3}{n^2 + 2} \quad (3)$$



## THE SOURCE OF LIGHT INFORMATIVE STIMULATION

An efficient source to achieve control intensity and quality energy flow is LED [5]. Mathematical models of the transfer of low-intensity light flux from the LED through a multilayer bio-environment to the object of stimulation based on the well-known radiation diagram of the light-emitting diode and the Maxwell equations are developed within the framework of the eikonal theory [6]. The intensity of the radiation of such a source is determined at the appropriate boundary conditions [6] and a recursive algorithm for specifying the intensity of radiation after the transfer of its energy through the layers of the biological environment is constructed [16–18].

In previous studies, the construction of a mathematical model of the source of radiation in a LED is based on a physically abstract object — the dipole [16–18]. In the remote from the source (dipole) in the space  $P_0$  (Fig. 1), waves are represented by strengths:

$$\vec{E}_0 = \vec{e}(r)e^{ik_0\ell(r)}, \quad \vec{H}_0 = \vec{h}(r)e^{ik_0\ell(r)}, \quad (4)$$

where  $\vec{E}_0, \vec{H}_0$  — electric and magnetic field components,  $r$  — is the distance from the dipole,  $\ell(r)$  — the "optical length",  $\vec{e}$  and  $\vec{h}$  the vector-function of the position of the dipole,  $k_0 = \omega/c = 2\pi/\lambda_0$ ,  $\lambda_0$  — the wavelength,  $c$  is the speed of light.

In the Cartesian coordinate system  $(x, y, z)$  with the origin at the point  $P_l$  (the Gaussian image of the source  $P_0$ ) and in the direction of applicate  $z$  along the axis  $cP_l$  the irradiated points lie.

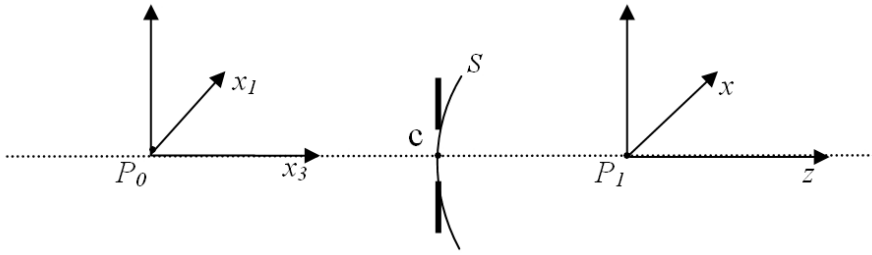
The approximate expression of the field at these points (in the region of the aperture of radiation, except for points that are in close proximity to its edge, Fig. 3), takes on the form [6, 16–18]:

$$\begin{aligned} \vec{E}_\omega(x, y, z, t) &= Re \left\{ \frac{\omega^2}{c^2} \vec{e}_\omega(x, y, z) e^{i \left\{ \delta(\omega) - \omega \left[ t - \frac{1}{c} \ell_\omega(x, y, z) \right] \right\}} \right\}, \\ \vec{H}_\omega(x, y, z, t) &= Re \left\{ \frac{\omega^2}{c^2} \vec{h}_\omega(x, y, z) e^{i \left\{ \delta(\omega) - \omega \left[ t - \frac{1}{c} \ell_\omega(x, y, z) \right] \right\}} \right\}, \end{aligned} \quad (5)$$

where  $\vec{E}_\omega(x, y, z, t)$ ,  $\vec{H}_\omega(x, y, z, t)$  — is the Fourier transform of the vectors of electrical and magnetic strengths,  $\vec{e}_\omega(x, y, z)$ ,  $\vec{h}_\omega(x, y, z)$  — the amplitudes and  $\delta(\omega)$  — the phase of their vector functions,  $\ell_\omega(x, y, z)$  — the optical length from point  $P_0$  to point  $P_l(x, y, z)$ .

In the stimulation system (LED — object of action):

(a) the geometric front  $W$  of the light wave in the space of its LED source is at a large distance  $P_0c$ , (Fig. 3), in comparison with the length of the  $\lambda_0$  wave, the angles  $\theta$ , the rays of which form the axis of the system, are small;



**Fig. 3.** Scheme of LED's radiation space (dipoles in  $P_0$  and a wave sphere front  $W$  conditionally not shown).  $S$  — the reference sphere front,  $c$  — centre of the LED lens, ..... — axes of the system

(b) at any given time, the Fourier transform  $\vec{E}_\omega$  and  $\vec{H}_\omega$  the field strengths (5) at this distance do not vary significantly in magnitude and direction;

(c) when integrating the expression (5) with respect to part  $S'$  (covering the lens) of the reference sphere  $S$  (reference for  $P_1$  the sphere  $S$  passes through the center of the lens of the light emitting diode,  $cP_1 = R$ ) is neglected by the coefficient of curvature on  $S'$ ;

(d) in a homogeneous-layered, non-magnetic irradiation environment  $|\vec{h}_\omega| = n|\vec{e}_\omega|$ , where  $n$  is the refractive index of the corresponding layer;

(e) on to  $S$ , as on  $W$ , the vectors  $|\vec{e}_\omega|$  and  $|\vec{h}_\omega|$  amplitudes are practically constant in magnitude and direction, the diameters of the lens pulled to  $P_1$  are small if at a distance  $R$  from a certain typical point  $(x', y', z')$  in the reference sphere  $S$  to  $P_1$  the vectors  $\vec{e}_\omega(x', y', z')$  and  $\vec{h}_\omega(x', y', z')$  do not change noticeably on the surface of the integration. It is possible to assume, that their values, which they gain in the center  $c$  with an LED lens —  $\vec{e}_\omega(0, 0, -R)$  and  $n\vec{e}_\omega(0, 0, -R)$  where  $R = cP_1$ , Fig. 3;

(f) according to (e) conditions,  $\vec{e}_\omega(0, 0, -R) = a(\omega)\vec{\alpha}(\omega)$ ,  $\vec{h}_\omega(0, 0, -R) = na(\omega)\vec{\beta}(\omega)$ , where  $\vec{\alpha}(\omega)$  and  $\vec{\beta}(\omega)$  is unit orthogonal vectors in a plane perpendicular to  $z$ .

The result of the integration in the region of the Gaussian image of the radiation source  $P_0$  in the direction along the axis  $z$  to the point  $P_1(X, Y, Z)$  (where the intensity will be determined) [6]:

$$\begin{aligned}\vec{E}_\omega(X, Y, Z, t) &= Re \left\{ \frac{\omega^2}{c^2} U_\omega(X, Y, Z) a(\omega) \vec{\alpha}(\omega) e^{i[\delta(\omega) - \omega t]} \right\}, \\ \vec{H}_\omega(X, Y, Z, t) &= Re \left\{ \frac{\omega^2}{c^2} U_\omega(X, Y, Z) na(\omega) \vec{\beta}(\omega) e^{i[\delta(\omega) - \omega t]} \right\},\end{aligned}\tag{6}$$

where

$$U_{\omega}(X, Y, Z) = \frac{\omega}{2\pi ic} \iint_{S'} \frac{e^{i\omega[\ell(x', y', z') + s]/c}}{S}, \quad (7)$$

the scalar wave function, is determined from the eikonal radiation function at the point  $P_0$  [6].

From (6), the Poynting vector  $S_{\omega} = c[E_{\omega} \times H_{\omega}]/4\pi$ ; by the average over time it is established that the intensity of the radiation in  $P_l(X, Y, Z)$  of the total dipole in  $P_0$  is proportional to the square of the module of the scalar wave function (7). In calculating the intensity in the irradiation area averaging over time is performed for each of the frequency components of each Cartesian component  $E$  and  $H$  of the complete field [6]. Only the contribution of the components of the dipoles along the axes  $x_1$  and  $x_2$  is significant. For the angles  $\theta_1(\omega)$  and  $\theta_2(\omega)$  between the unit vectors  $\alpha_1(\omega)$  and  $\alpha_2(\omega)$  along the  $x$  axes and  $\alpha_1(\omega)$ ,  $\beta_1(\omega)$  and  $\alpha_2(\omega)$ ,  $\beta_2(\omega)$  — the mutually orthogonal vectors in the plane perpendicular to the direction  $z$  (Fig.3), the components  $E$  and  $H$  are approximated this way [6]:

$$\begin{aligned} E_z(X, Y, Z, t) &= H_z(X, Y, Z, t) = 0, \\ E_x(X, Y, Z, t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} U_{\omega}(X, Y, Z) f(\omega) e^{-i\omega t} d\omega, \\ H_y(X, Y, Z, t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} U_{\omega}(X, Y, Z) f(\omega) e^{-i\omega t} d\omega, \\ E_y(X, Y, Z, t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} U_{\omega}(X, Y, Z) g(\omega) e^{-i\omega t} d\omega, \\ -H_x(X, Y, Z, t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} U_{\omega}(X, Y, Z) g(\omega) e^{-i\omega t} d\omega, \end{aligned} \quad (8)$$

where

$$\begin{aligned} f(\omega) &= \frac{\omega^2}{c^2} \left[ a_1(\omega) \cos \theta_1(\omega) e^{i\delta_1(\omega)} + a_2(\omega) \cos \theta_2(\omega) e^{i\delta_2(\omega)} \right], \\ g(\omega) &= \frac{\omega^2}{c^2} \left[ a_1(\omega) \sin \theta_1(\omega) e^{i\delta_1(\omega)} + a_2(\omega) \sin \theta_2(\omega) e^{i\delta_2(\omega)} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

For reasons of convergence it is assumed that the radiation field exists only between the moments  $t < |T|$ , where  $T \gg 2\pi/\omega$  to go to the limit  $T \rightarrow \infty$ .

Thus, at the point  $P_l(X, Y, Z)$  the intensity  $I(X, Y, Z)$  is defined as the time average over the energy  $U^2$ , which is transferred across the unit area [6]:

$$I(X, Y, Z) = \frac{c}{4\pi T} \int_0^\infty |U_\omega(X, Y, Z)|^2 \left[ |f(\omega)|^2 + |g(\omega)|^2 \right] d\omega =$$

$$= C \int_0^\infty |U_\omega(X, Y, Z)|^2 d\omega, \quad (10)$$

$$C = \frac{c}{4\pi T} \int_0^\infty \left[ |f(\omega)|^2 + |g(\omega)|^2 \right] d\omega. \quad (11)$$

If the interval  $|\Delta\omega|$  small enough then  $|U_\omega|$  practically does not depend on  $\omega$  in the effective frequency range, so that:

$$I(X, Y, Z) = C |U_\omega(X, Y, Z)|^2. \quad (12)$$

The coefficients  $a_1$  and  $a_2$  are determined from the set of dependencies between  $\vec{e}(r)$ ,  $\vec{h}(r)$  and  $\ell$ , that follows from the Maxwell equations [16], and the averaging over time of the Poynting vector  $\langle S \rangle = (c/8\pi) \text{Re}(\vec{e} \times \vec{h}^*)$  [6, 16]:

$$\langle S \rangle = (c/8\pi\mu) \left\{ (\vec{e} \cdot \vec{e}^*) \nabla \ell - (\vec{e} \cdot \nabla \ell) \vec{e}^* \right\} = (2c/n^2) \langle w_e \rangle \nabla \ell, \quad (13)$$

where  $\langle w_e \rangle$  — the energy density of the electric field is averaged over time; since in air  $\langle w_e \rangle = \langle w_h \rangle$ , then, the density of the total energy of the field  $\langle w \rangle = \langle w_h \rangle + \langle w_e \rangle = 2\langle w_e \rangle$ ,  $c/n = v$  — is the velocity of its transfer. Than we obtain strength vectors  $\vec{e}, \vec{h}$ , since

$$(\vec{e} \cdot \vec{e}^*) \vec{s} = (8\pi/\epsilon v) \langle S \rangle, \quad (14)$$

where  $\langle S \rangle = I_0$  — the power of the emitted light.

For a light emitting diode it is determined from its diagram. Thus, it is established that the average time energy transferred through the unit of surface area allows the vectors of the LED radiation source to be determined from its radiation diagram [6, 18]. Using the relation (3), and formula (11) one can determine:

a) the intensity of  $I_l$  after the first layer of the medium; b) vectors  $\vec{e}_1$  and  $\vec{h}_1$ ; c) the intensity  $I_{m+1}$ , after the subsequent layers of the medium and the vectors  $\vec{e}_{m+1}$  and  $\vec{h}_{m+1}$ . A generalized formula for determining the intensity of irradiation of a surface after the m-layer of the medium acquires the form:

$$I_m = C_m I_{m-1}, \quad m = \overline{1, M}, \quad (15)$$

where  $M$  — the number of layers of the medium,  $C_m$  — is determined by formula (11) taking into account the values of the refractive indices  $n_m$  of the layers of the bio-environment, the intensity  $I_0$  is determined by measurement.

The algorithm of this method of non-invasive determination of intensity through skin irradiation at the level of dermis when stimulating the human body is given in [18].

## RESULTS OF SPECIFICATION OF INFORMATIONAL ASPECTS GAPTIC STIMULATION BY THE LIGHT

Ensuring the optimality of processes in biological systems of the human body in the extreme forms of its activity requires the study of the role of informational aspects and taking into account them in the development of technical systems for such appointment. Systems of the automated control of an organism's condition, using transcutaneous stimulation with light and an analysis of the response to stimulation, are perspective. Contradictory requirements for non-invasiveness, informativeness, computational and hardware complexity necessitate the use of haptic stimulation with the light, control of its intensity at the receptor level, and a statistically reliable evaluation of feedback received from the body in the normal and under the influence of external extreme conditions.

For the effective obtaining of reliable results of stimulation it is necessary to provide metrological testing of the source's LED. It is established that passport data are not all metrological sources of LED sources, for example, LED diagrams HL-508H238WC-MD [19], Fig. 4 (a).

Measuring the intensity of the HL-508H238WC-MD radiation, Fig. 4 (b), it was established that the diagram was obtained by testing in the conditions B of the CIE standard light intensity measurements [20, 21], Table 1.

For the angle  $\theta = 0^\circ$ , when  $\varepsilon = 1$ ,  $n = 1$ , under the formula (11) it is obtained that  $|e| = |h| = 4 \cdot 10^{-4}$  v/m. The value used to calculate the intensity of light on the dermis (Fig. 1).

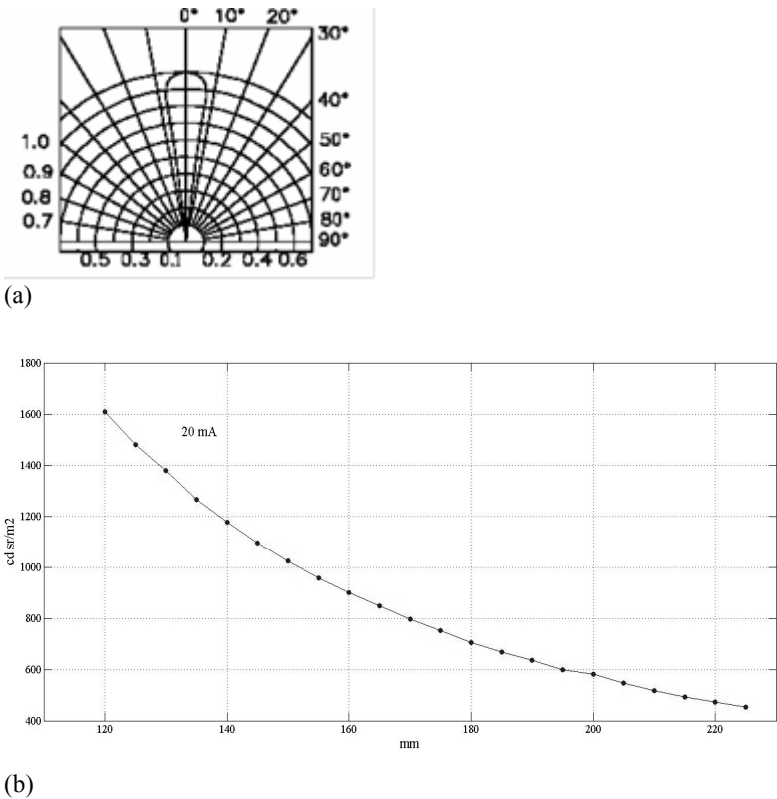
$$a_1 = |e|/n_1, \quad a_2 = |e|. \quad (16)$$

When the dipole field strengths  $E$  and  $H$  located along axes  $x_1$  and  $x_2$  (Fig. 3), and  $\delta(\omega) \rightarrow 0$ , to see (5), the coefficient  $C$  at different refractive index takes of the view is given on Fig. 5.

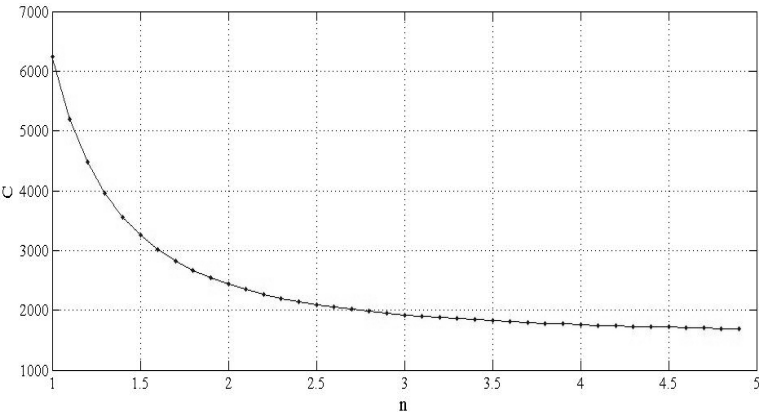
The intensity of irradiation (10, 12) decreases according to formula (11) of the coefficient  $C$  with an increase in the index of refraction of the medium layer, Fig. 5. The change in the relative values of the tensions in (2), in particular, the ratio (3), Fig. 2, made it possible to construct a formula (15) for determining the intensity of irradiation of the layer at a predetermined intensity level, and the scheme of the structure of the biotechnical system, Fig. 6.

**Table 1.** Results of the measurements of LED radiation

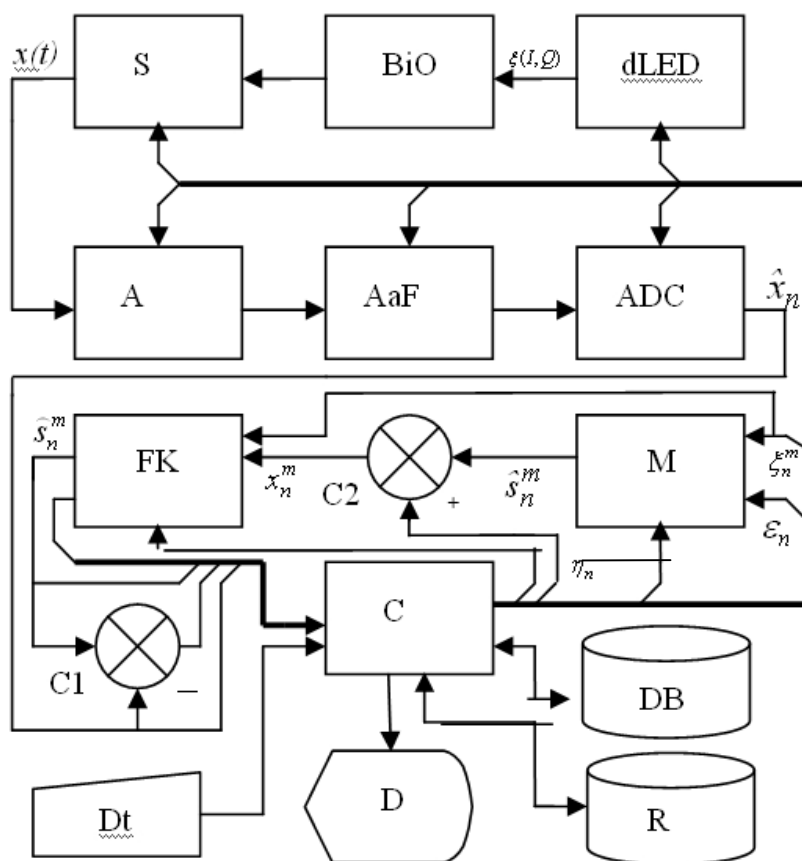
Input		Output	
Direct current, mA	20	E, lx	130
Distance, m	$1.2 \cdot 10^{-1}$	I0, cd	18.7
Surface square, m2	$4.9 \cdot 10^{-4}$	Power, W	$9.34 \cdot 10^{-4}$
Solid angle, sr	$3.410^{-2}$	I9, W/m2	1.9



**Fig. 4.** a) LED radiation diagram.  $k_r = l_0 / r$ ,  $l_0$  — standard distance,  $\theta$  — angle; (b) Intensity  $I(\theta, r)$  of LED radiation,  $\theta = 0$



**Fig. 5.** Graphic of the view of the coefficient  $C$  at different refractive index



**Fig. 6.** Schema of the biotechnical system

In the system, the intensity of the stimuli is controlled by the change in the amplitude-spectral characteristics of the I radiation and the frequency-time parameters of the Q (duty cycle) of the shape of the pulses of stimulation by the controller C through the LED-driver dLED — programmatically or remotely, through the keyboard Dt, the display D, the network (router R). The stimulus is fed to the bioactive point of the BiO of the organism, with the S sensor being selected from the corresponding point and fed to the bioamplifier A, an antialiasing filter AaF and an analog-to-digital ADC converter. The sequence of the response sample code is fed to the Kalman filter (FK, C1, M) for optimal filtration (the result of the filtering is the sequence of the m-type response sampling code, and the error estimate), and the DB database. In the memory of M there are stored models of noise, responses of biological objects in the normal state. The comparator C2 serves when selecting from the database the types of noise and feedback normally in the Kalman filter.

The system is multifunctional, in particular, with the metrological testing of the LED's source of stimulation, automated control and correction of the body's condition with the search and use of the haptic level of transcutaneous stimulation by the light, statistical estimation of the response to stimulation, etc.

## CONCLUSIONS

Due to the specification of the problem of controlling and correcting the state of the human organism in the extreme conditions of its life on the basis of the combination of Maxwell's phenomenological theory and the atomic theory of matter and optics, it was obtained:

- a) requirements to the functions and structure of the body's stimulation system with the light;
- b) calculation formulas for representing the functional blocks of the system;
- c) the method of recursive determination of the intensity of the light flux after each layer of the biological environment;
- d) low computational complexity of testing and automated haptic control and correction of the body's condition;
- e) conditions are provided to confirm the statistical significance of representative samples of the body's responses to haptic stimulation of it through biologically active points.

## REFERENCES

1. NRC. 2024. Convergence: Facilitating Transdisciplinary Integration of Life Sciences, Physical Sciences, Engineering and Beyond. Washington, DC: The National Academies Press 153 p. URL: [http://ribonode.ucsc.edu/SciEd/pdfs/NAP\\_Convergence.pdf](http://ribonode.ucsc.edu/SciEd/pdfs/NAP_Convergence.pdf) (Last accessed: 20.03.17).
2. Eyre H. A. et al. Strengthening the role of convergence science in medicine. *Convergent science physical oncology*. 2015. vol. 1. №2. 11 p. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/2057-1739/1/2/026001/pdf> (Last accessed: 20.03.17).
3. Baker-Jarvis J., Kim S. The Interaction of Radio — Frequency Fields With Dielectric Materials at Macroscopic to Mesoscopic Scales. *Journ. of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 2012. vol. 117. February 2. 60 p.
4. Yanenko O., Adamenko V., Shevchenko K., Kuz V. Automated system for irradiation of biologically active points of the human body. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*. 2017. vol. 86. №2. P. 83–89.
5. Nair G.B., Dhoble S.J. A perspective perception on the applications of light-emitting diodes. *Wiley Online Library, Luminescence*. 2015. vol. 30 P. 1167–1175 URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bio.2919/full> (Last accessed: 13.03.2015).
6. Born M., Wolf E. *Principles of optics*, Great Britain, Exeter, 1986. 831 p.
7. Adam D. *Perception, consciousness, memory. Fusion of a biologist*, Moscow, 1983. 152 p. (in Russian).
8. King A. S. A Historical Note on the Discovery of the Depressor Nerve. *British Veterinary Journal*, 1956, vol. 112, Issue 9 pp. 353–356.
9. Sherrington C. S. *The Integrative Action of the Nervous System*, USA, 1920. 412 p.
10. Gibson J.J. *The perception of the visual world*, Cambridge, Massachusetts: The Riverside Press, 1950. 240 p.
11. Glückstad J., Palima D. *Light Robotics — Structure-mediated Nanobiophotonics*, Elsevier, 2017. 452 p.
12. *Health Effects of Artificial Light*. European Commission - Europa EU : SCENIHR. 118 p. URL: [https://ec.europa.eu/health/scientific\\_committees/emerging/docs/scenih\\_r\\_o\\_035.pdf](https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/emerging/docs/scenih_r_o_035.pdf) (Last accessed: 20.03.17).
13. McGrath J. A., Eady R. A. J., Pope F. M. *Anatomy and organization of human skin. Rook's Textbook of dermatology*, Oxford : Blackwell Science Ltd Oxford, 2004. pp. 3.1–3.84.
14. Okamoto K., Tashiro A., Chang Z., and Bereiter D. A. Bright light activates a trigeminal nociceptive pathway. *Pain*, 2010, vol. 149, № 2 pp. 235–242.



15. Tuchin V.V. *Optics of biological tissues. Methods of light scattering in medical diagnostics*. M : Fizmatlit, 2013. 812 p. *In Russian*
16. Bachynskyy M.V., Stoyanov Yu. M., Yavorskyy B.I. Identification of parameters of dipole model of the LED radiation source. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*, 2017, vol. 85, №1 pp. 118–125.
17. Bachynskyy M.V., Stoyanov Yu. M., Yavorskyy B.I. Mathematical modeling of LED radiation in the system of medical diagnostics. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*, 2016, vol. 84, №4 pp. 124–130.
18. Bachynskyy M.V., Stoyanov Yu. M., Yavorskyy B.I. Determination of non-intensive light flux intensity after propagation through layered biological environment. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*, 2017, vol. 86, №2 pp. 101–107.
19. HONGLITRONIC, Part: HL-508H238WC-MD. — Honglitronic. — 5.23.2012. — 5 p. [Electronic resource]. Access mode: <http://leds.com.ua/assets/products/datasheets/121.pdf> (last access: 20.03.17).
20. *Handbook of LED Metrology*. INSTRUMENT SYSTEMS GmbH, version 1.1, 2016. 42 p.
21. Bachynskyy M.V., Tymkiv P.O., Demchuk L.B. *Determination of lighting characteristics of low intensity medical light-emitting diodes. Methodic of measurement MB-001LED-2017*. Ternopil : National Technical University named after Ivan Puluj, Testing laboratory of X-ray medical technique, 2012. 19 p. (In Ukrainian).

Reseived 15.11.2017

#### ЛИТЕРАТУРА

1. NRC. 2024. Convergence: Facilitating Transdisciplinary Integration of Life Sciences, Physical Sciences, Engineering and Beyond. Washington, DC: The National Academies Press 153 p. URL: [http://ribonode.ucsc.edu/SciEd/pdfs/NAP\\_Convergence.pdf](http://ribonode.ucsc.edu/SciEd/pdfs/NAP_Convergence.pdf) (Last accessed: 20.03.17).
2. Eyre H. A. et al. Strengthening the role of convergence science in medicine. *Convergent science physical oncology*, 2015, vol.1, №2 11 p. URL: [Http://iopscience.iop.org/Article/10.1088/2057-1739/1/2/026001/Pdf](http://iopscience.iop.org/Article/10.1088/2057-1739/1/2/026001/Pdf) (last accessed: 20.03.17).
3. Baker-Jarvis J., Kim S. The Interaction of Radio - Frequency Fields With Dielectric Materials at Macroscopic to Mesoscopic Scales. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 2012, vol. 117, February 2, 60 p.
4. Yanenko O., Adamenko V., Shevchenko K., Kuz V. Automated system for irradiation of biologically active points of the human body. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*, 2017, vol. 86, №2 pp. 83–89.
5. Nair G.B., Dhoble S.J. A perspective perception on the applications of light-emitting diodes. *Wiley Online Library, Luminescence*, 2015, vol. 30 pp. 1167–1175 URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bio.2919/full> (Last accessed: 13.03.2015).
6. Born M., Wolf E. *Principles of optics*, Great Britain, Exeter : A. Eaton & Co. Ltd., 1986. 831 p.
7. Адам Д. *Восприятие, сознание, память. Размышление биолога*, М.: Мир, 1983. 152 с.
8. King A. S. A Historical Note on the Discovery of the Depressor Nerve. *British Veterinary Journal*, 1956, vol. 112, Issue 9 pp. 353–356.
9. Sherrington C. S. *The Integrative Action of the Nervous System*, USA, 1920. 412 p.
10. Gibson J.J. *The perception of the visual world*, Cambridge, Massachusetts: The Riverside Press, 1950. 240 p.
11. Glückstad J., Palima D. *Light Robotics — Structure-mediated Nanobiophotonics*, Elsevier, 2017. 452 p.
12. *Health Effects of Artificial Light*. European Commission — Europa EU : SCENIHR. 18 p. URL: [https://ec.europa.eu/health/scientific\\_committees/emerging/docs/scenihr\\_o\\_035.pdf](https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/emerging/docs/scenihr_o_035.pdf) (Last accessed: 20.03.17).
13. McGrath J. A., Eady R. A. J., Pope F. M. *Anatomy and organization of human skin. Rook's Textbook of dermatology*, Oxford : Blackwell Science Ltd Oxford, 2004. pp. 3.1–3.84.
14. Okamoto K., Tashiro A., Chang Z., and Bereiter D. A. Bright light activates a trigeminal nociceptive pathway. *Pain*, 2010, vol. 149, №2 pp. 235–242.

15. Тучин В.В. *Оптика биологических тканей. Методы рассеяния света в медицинской диагностике*. М.: Физматлит, 2013. 812 с.
16. Bachynskyy M.V., Stoyanov Yu. M., Yavorsky B.I. Identification of parameters of dipole model of the LED radiation source. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*, 2017, vol. 85, №1 pp. 118–125.
17. Bachynskyy M.V., Stoyanov Yu. M., Yavorsky B.I. Mathematical modeling of LED radiation in the system of medical diagnostics. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*, 2016, vol. 84, №4 pp. 124–130.
18. Bachynskyy M.V., Stoyanov Yu. M., Yavorsky B.I. Determination of non-intensive light flux intensity after propagation through layered biological environment. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*, 2017, vol. 86, №2 pp. 101–107.
19. HONGLITRONIC, Part: HL-508H238WC-MD. — Honglitronic. — 5.23.2012. — 5 p. URL: <http://leds.com.ua/assets/products/datasheets/121.pdf> (Last accessed: 20.03.17).
20. *Handbook of LED Metrology*. INSTRUMENT SYSTEMS GmbH. version 1.1, 2016. 42 p.
21. Бачынський М.В., Тымків П.О., Дэмчук Л.Б. *Определение светотехнических параметров низкой интенсивности светодиодов медицинского назначения. Методика измерения MB-001LED-2017*. Тернопіль: Національний технічний університет імені Івана Пулюя. Испытательная лаборатория X-лучевой медтехники, 2012. 19 с.

Получено 15.11.2017

*М.В. Бачинський*, канд. техн. наук, доцент,

доцент кафедри біотехнічних систем

e-mail: [m\\_bachynskiy@ukr.net](mailto:m_bachynskiy@ukr.net)

*Б.І. Яворський*, д-р техн. наук, проф.,

проф. кафедри біотехнічних систем

e-mail: [biotehnic0@gmail.com](mailto:biotehnic0@gmail.com)

Тернопільський національний технічний університет

ім. Івана Пулюя, ул. Руська, 56, Тернопіль, 46001, Україна

## ІНФОРМАЦІЙНІ АСПЕКТИ ГАПТИЧНОГО СТИМУЛЮВАННЯ СВІТЛОМ ДЛЯ КОРЕГУВАННЯ СТАНУ ЛЮДИНИ

Розглянуто аспекти інформаційних процесів в медико-біологічних системах організму людини в екстремальних умовах її діяльності та розвинуто теорію медичних інформаційних систем з урахуванням стану і тенденцій конвергенції суспільства, екосистеми і технологій. Запропоновано специфікацію інформаційних аспектів гаптичної стимуляції світлом для корекції функціонального стану організму та розвитку й дослідження вимог до функцій, методів та структур відповідних біотехнічних систем. Наведено функціональну схему біотехнічної системи та результати аналізу зміни інтенсивності світла при поширенні його у шаруватому біо середовищі від світлодіодного джерела стимуляції.

**Ключові слова:** гаптична стимуляція, світло, інформаційна біотехнічна система.

*М.В. Бачинский*, канд. техн. наук, доцент,  
доцент кафедры биотехнических систем  
e-mail: m\_bachynskiy@ukr.net

*Б.И. Яворский*, д-р техн. наук, проф.,  
проф. кафедры биотехнических систем  
e-mail: biotehnic0@gmail.com

Тернопольский национальный технический университет  
им. Ивана Пулюя, ул. Руська, 56, Тернополь, 46001, Украина

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ ГАПТИЧЕСКОГО СТИМУЛИРОВАНИЯ СВЕТОМ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА

**Введение.** Изучение законов и принципов информационных процессов в медико-биологических системах человеческого тела в экстремальных условиях его деятельности и развитие теории медицинских информационных систем такого назначения с учетом состояния и тенденций сближения общества, экосистемы и технологии становятся очень актуальными. Такое положение дел позволяет утверждать, что это актуальная научная и прикладная проблема радикального изменения существующей парадигмы проектирования информационных систем.

**Цель статьи** — уточнить информационные аспекты низкой интенсивности тактильной стимуляции светом, которая необходима для коррекции функционального состояния организма человека, работающего в экстремальных условиях, и дальнейшего развития и исследования таких методов и систем.

**Методы.** Анализ требований, функций и систем для проектирования синтеза информационных технологий и контрольной биотехнической системы коррекции функционального состояния организма человека, работающего в экстремальных условиях. Теоретические и экспериментальные зависимости между энергией стимуляции светового излучающего диода и энергией передаются через слоистую структуру биоресурсов. Математическое моделирование и компьютерное моделирование. Сравнение этих реальных и модельных данных.

**Результаты.** Базовые аспекты требований, функций и систем для разработки, синтеза информационных технологий и управляющих биотехнических систем коррекции функционального состояния организма человека, работающего в экстремальных условиях, с низкой интенсивностью тактильной стимуляции светом. Получены методы определения интенсивности  $I_0$  излучения светодиода, рекурсивные выражения  $I_m = C_m I_{m-1}$ ,  $m = \overline{1, M}$  и формулы для коэффициента  $C_m$ , где  $M$  — количество слоев биосреды. Использована связь феноменологической теории Максвелла с атомистической теорией материи и оптикой.

Исследования компьютерного моделирования подтвердили результат спецификации требований, функциональных и структурных схем биотехнической системы.

**Выводы.** Благодаря спецификации требований была получена возможность построения рекурсивного определения интенсивности светового потока после каждого слоя биосреды и низкая вычислительная сложность. Разработаны информационные технологии для автоматизации оптимального управления состоянием человека при внешних воздействиях на организм. Открыты пути дальнейшего исследования для подтверждения статистической значимости и репрезентативности выборок наблюдений.

**Ключевые слова:** тактильная стимуляция, свет, информационная биотехническая система.

---

DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt191.01.076>

УДК 617.7-073.178:004

**І.В. КАПЛІН**<sup>1</sup>, лікар-офтальмолог Київського центру терапії та мікрохірургії ока, аспірант кафедри офтальмології  
e-mail: smashdown@mail.ru

**М.Л. КОЧИНА**<sup>2</sup>, д-р. біол. наук, проф.,  
зав. кафедри медико-біологічних основ спорту та фізичної реабілітації  
e-mail: kochinaml@gmail.com

**А.Г. ФІРСОВ**<sup>3</sup>, канд. техн. наук, головний конструктор  
e-mail: shagrath.hire@gmail.com

<sup>1</sup> Харківська медична академія післядипломної освіти,  
вул. Амосова, 58, 61000, м. Харків, Україна

<sup>2</sup> Чорноморський національний університет ім. Петра Могили,  
вул. 68 Десантників, 10, 54000, м. Миколаїв, Україна

<sup>3</sup> ТОВ «АСТЕР-АЙТИ», вул. Авіаційна 1, к. 7, 61166, м. Харків, Україна

## **КОНЦЕПЦІЯ ТЕЛЕМЕДИЧНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ЕКСПРЕС-ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ ВНУТРІШНЬООЧНОГО ТИСКУ**

---

*Запропоновано концепцію телемедичної системи експрес-оцінювання рівня внутрішньоочного тиску, заснованої на аналізі параметрів інтерференційних картин, які спостерігаються на рогівці живого ока в поляризованому світлі. Надано результати розроблення методу визначення параметрів інтерференційних картин в автоматизованому режимі з використанням розробленого програмного забезпечення, двохрановного (лінійного та кільцевого) показника точок ізохром. Периметр ізохром автоматично визначають шляхом підрахунку кількості пікселів на її замкнутому контурі, площу — шляхом підрахунку кількості пікселів, які заповнюють її внутрішню область.*

**Ключові слова:** телемедична система, поляризоване світло, інтерференційні картини, ізохром, параметризація.

### **ВСТУП**

На сьогодні в світі налічують понад 60-ят мільйонів хворих на глаукому, десята частина яких повністю втратила зір. Проблема глаукоми займає одне з ключових місць у сучасній офтальмології. В Україні за період з 1996 по 2007 рр. захворюваність на глаукому перемістилась з четвертого на друге місце (15–20% від усіх захворювань) серед причин інвалідності дорослого населення внаслідок захворювань ока та його придаткового апарату [1]. Високий відсоток несприятливих результатів захворювання зумовлено

КАПЛІН І.В., КОЧИНА М.Л., ФІРСОВ А.Г., 2018

ISSN 2519-2205 (Online), ISSN 0454-9910 (Print). Киб. и выч. техн. 2018. № 1 (191)

низкою причин, серед яких найбільш значущими є пізня діагностика і некоректна оцінка даних гідродинаміки ока, отриманих шляхом вимірювання внутрішньоочного тиску (ВОТ).

Розроблення нових неінвазивних методів дослідження і діагностики патології ока, а також удосконалення наявних є актуальним завданням. Тому великий теоретичний і практичний інтерес мають методи, засновані на дослідженні тканин ока в поляризованому світлі [1, 5–9, 10]. У разі освітлення рогівки живого ока поляризованим білим світлом на ній спостерігається специфічна інтерференційна картина (ІК). ІК є набором забарвлених смуг (ізохром), розташованих у периферії рогівки.

Смуги утворюють фігуру, схожу з ромбом, кути якого спираються на горизонтальний і вертикальний меридіани ока. Картину перетинають темні смуги, що утворюють фігуру рогівкового хреста (ізокліни) [10, 14, 17, 19].

Живе око постійно знаходиться в напружено-деформованому стані (НДС), оскільки на його оболонку зсередини діє внутрішньоочний тиск (ВОТ), а зовні — екстраокулярні м'язи (ЕОМ). Дія прямих ЕОМ розтягує рогівку і стискає склеру, а косих — тільки стискає склеру, оскільки вони прикріплені за екватором і спрямування їх зусиль таке, що вони не змінюють внутрішніх напружень в рогівці ока [1, 7, 9, 15].

Використання поляризованого світла дозволяє візуалізувати розподіл внутрішніх напружень в рогівці живого ока і досліджувати вплив різних чинників на форму ІК, яка спостерігається. Появу ІК на рогівці зумовлено ефектом фотопружності, який виникає за умови механічного напруження в ній [10, 12, 14, 17, 18, 20]. Крім того, сама речовина рогівки також має властивість оптичної анізотропії, що зумовлено анізотропією рогівкового колагену, а також взаємним розташуванням його волокон в рогівці [14, 13, 16, 18]. Рогівка має різну товщину в різних точках (найбільш тонка в центрі і потовщена на периферії), що також впливає на розподіл напруження в ній.

Таким чином, оптична анізотропія рогівки ока має складну природу, оскільки пов'язана зі структурою рогівкового колагену і взаємним розташуванням його волокон в тканині рогівки, формою самої рогівки, механічними зусиллями з боку ВОТ і ЕОМ. Було запропоновано умовно розділити оптичну анізотропію рогівки на статичну і динамічну [3–5].

## **ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ**

Детальне вивчення поляризаційно-оптичних властивостей рогівки було проведено багатьма авторами, однак до теперішнього часу результати цих досліджень не набули широкого поширення в клінічній практиці [2, 7–10, 12, 16, 18]. Дослідження впливу різних рівнів ВОТ на форму і геометричні параметри інтерференційних картин очей [3, 15] дозволили встановити, що у разі підвищення ВОТ відбувається перерозподіл внутрішніх напружень в рогівці, що призводить до зміни форми ІК. Цю властивість ІК може бути використано для оцінювання рівня ВОТ без контакту з оком пацієнта.

Для практичного застосування ІК під час дослідження рівня ВОТ у хворих на глаукому необхідно було розробити метод параметризації зображень цих картин, оскільки було встановлено, що параметри ізохром корелюють зі значеннями ВОТ [3]. Параметризація зображень ІК особливо актуальна у зв'язку з розробленням телемедичної системи оцінювання

рівня ВОТ у хворих на глаукому, в якій передбачено самостійне (хворим або його близькими) отримання зображення ІК рогівки ока за допомоги смартфона, оснащеного поляроїдною приставкою, і передача цього зображення з використанням мобільних мереж в центр оброблення і діагностики. Розроблення такої системи дозволить пацієнтам самостійно контролювати рівень ВОТ, що особливо актуально для осіб, які проживають далеко від профільних лікувальних закладів.

**Мета роботи** — розроблення концепції телемедичної системи експрес-оцінювання рівня внутрішньоочного тиску з використанням параметрів інтерференційних картин, які спостерігаються на рогівці ока хворих на глаукому в поляризованому світлі.

## ОБСЯГ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для розроблення та апробації методу параметризації використано 50-ят ІК очей хворих на глаукому з різними рівнями ВОТ і 20-ять ІК здорових людей.

При розробленні методу параметризації ІК проведено аналіз сучасних систем керування базами даних (СКБД) з метою вибору її оптимальної конфігурації.

Наявні в даний час СКБД розрізняються за способом:

- організації зберігання інформації (реляційні, об'єктно-орієнтовані, ієрархічні, документ-орієнтовані, сховища типу «Ключ-Значення»);

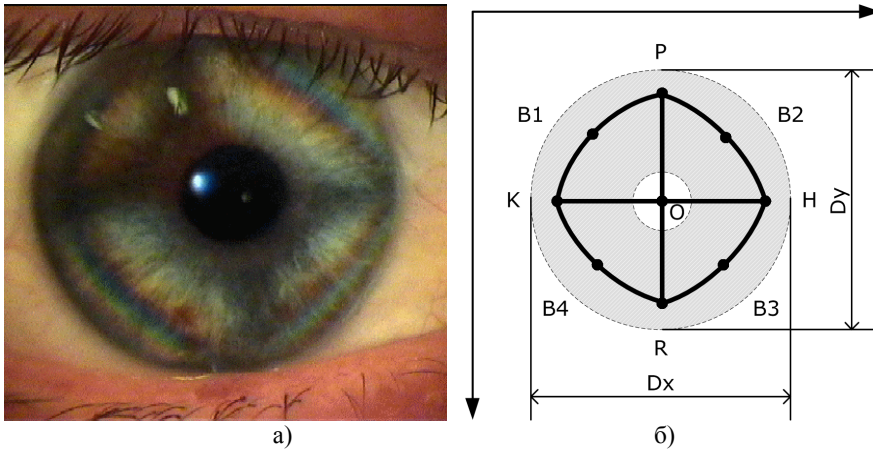
- доступу до даних (клієнт-серверні, файл-серверні і вбудовані тощо).

Стандартом, де-факто, в сучасних інформаційних системах є реляційні СКБД, в яких дані зберігаються в табличному вигляді. У нашому випадку, оскільки обсяг даних не великий і реалізація методу параметризації передбачається в середовищі операційної системи Microsoft Windows, використання файл-серверної СКБД Microsoft Access є найкращим. Різномірне програмне забезпечення (ПЗ) має однорідний загальний доступ до бази даних (що зберігається у вигляді файлу на фізичному носії) і обробляє дані.

Для розроблення ПЗ вибрано програмну платформу Microsoft .NETFramework і прикладний програмний інтерфейс Windows Forms для реалізації доступу до стандартних елементів графічного інтерфейсу Microsoft Windows (вікна, кнопки, меню тощо) в керованому коді середовища виконання .NET. Використання Windows Forms значно спростило розроблення ПЗ функціонального користувацького інтерфейсу в стилі Microsoft Windows.

## РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНИХ КАРТИН

Для параметризації ІК (рис 1, а) необхідно на площині знімка рогівки ока визначити координати точок, які досить точно описують ізохромні і ізокліни (рис 1, б). Попередні дослідження показали, що для параметризації ізоклін досить двох точок, а для ізохром — трьох. Оскільки розмір рогівки може відрізнятись у різних людей, а також для виключення впливу масштабу зображення, тобто для приведення результатів до єдиного масштабу, додатково необхідно визначати горизонтальний і вертикальний діаметри рогівки ( $D_x$ ,  $D_y$ ), обчислювати їх середні значення і нормувати всі визначені параметри за середнім діаметром.



**Рис. 1.** Знімок рогівки живого ока в поляризованому світлі (а) і схема інтерференційної картини (б)

Зображення ІК для розпізнавання досить складне, оскільки містить багато елементів, які не мають чітких контурів, а також елементів, які не несуть діагностичної інформації, а тільки «зашумовують» зображення. Навіть в разі повної автоматизації процесу параметризації зображень ІК виключати візуальну перевірку її якості експертом-людиною не можна. У розробленому нами способі оброблення ІК проводиться автоматизовано в інтерактивному режимі з використанням розробленого спеціалізованого програмного забезпечення (ПЗ).

Попередні дослідження показали, що потік надходження знімків ІК пацієнтів наразі невеликий і нерівномірний у часі, тому запропонований підхід буде мати достатню швидкість параметризації.

Також, підвищення ВОТ у пацієнта не вимагає надання екстреної допомоги, крім випадків гострого нападу глаукоми, який неможливо не помітити і без вимірювань. Отримання відповіді експерта протягом 20–30 хвилин після відправлення знімка дозволяє вжити необхідних заходів у разі виявлення підвищеного рівня ВОТ.

Як показала практика, час, витрачений на контроль якості, і обсяг візуального навантаження на експерта збігаються з часом і навантаженням у разі автоматизованої параметризації ІК з використанням ПЗ.

Алгоритм параметризації ІК надано на рис. 2. Оскільки очі обстежуваних пацієнтів іноді істотно відрізняються, то вбудований в камеру приладу процесор не досить якісно встановлює значення експозиції. Це призводило до того, що на деяких знімках лінії ізохром були тьмяними, а ізокліни слабо помітні через надлишкову загальну яскравість зображень.

Знімки в базі даних (БД) зберігаються в стислому вигляді, що забезпечує максимальний динамічний діапазон рівнів яскравості, тому з метою поліпшення якості знімків в алгоритм було введено блок нормалізації яскравості.

Оскільки в [6–10, 12] показано, що інформативність знімків ІК підвищується за умови монохромної зйомки, то далі зображення перетворюються з повнокольорового RGB оригіналу в копію, подану у відтінках сірого кольору. Для цього застосовано формулу, яку використовують для подання

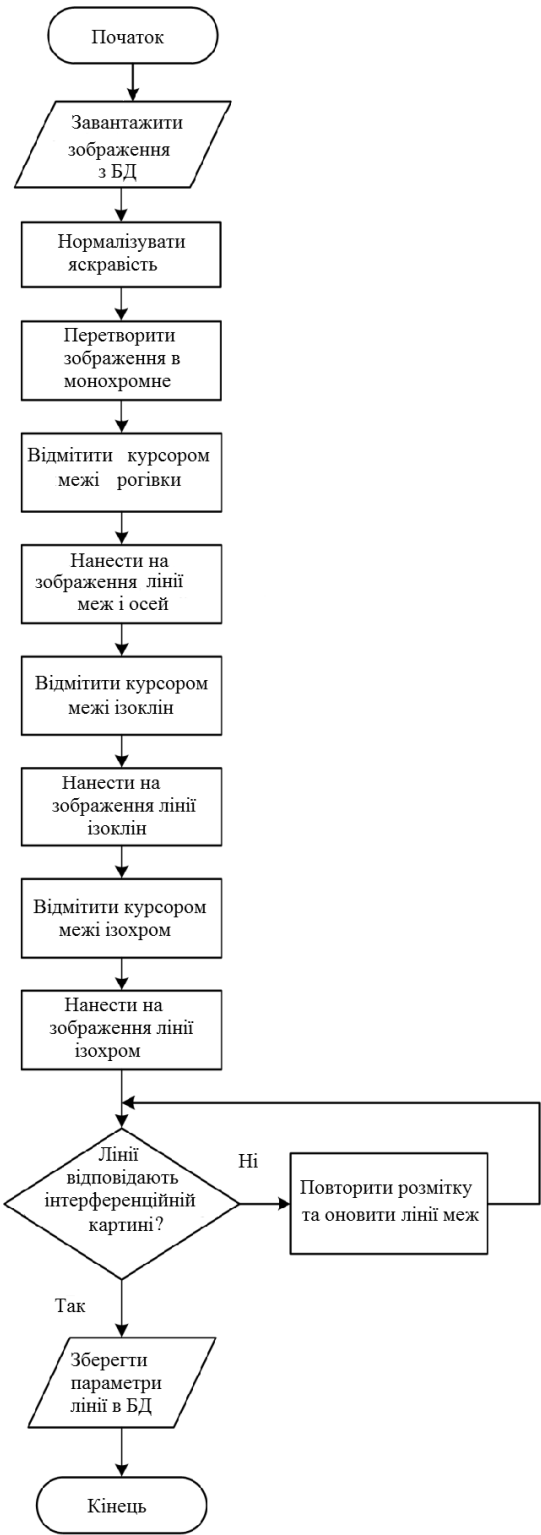


Рис. 2. Алгоритм параметризації інтерференційних картин



яскравості компоненти ( $Y'$ ) в колірному просторі YUV в системі PAL аналогового кольорового телебачення:

$$Y' = 0,299R + 0,587G + 0,114B,$$

де  $Y'$  — значення яскравості компоненти зображення;  $R, G, B$  — значення червоного, зеленого і синього компонент відповідно.

Після фіксації всіх меж рогівки на зображення автоматично наноситься контур цих меж і додаткова розмітка у вигляді вертикальної і горизонтальної осей (що перетинаються в центрі рогівки), а так само діагональних осей під кутом 45-ть градусів. Аналогічно здійснюється розмітка контурів ІК. Якщо в процесі параметризації стало помітно розбіжність розміченого контуру і реальної картини, експерт вибирає точку невідповідності і повторно її відзначає.

*Метод визначення параметрів ІК* виконують в кілька етапів відповідно до розробленого алгоритму (рис. 2). На першому етапі, після отримання кольорового зображення ІК, проводять нормалізацію його яскравості і перетворення в монохромне зображення.

На другому етапі проводять фіксацію меж рогівки за допомоги дворежимного показчика, після чого на зображення автоматично наносять контур рогівки, а також додаткову розмітку у вигляді вертикальної і горизонтальної осей. Точний розмір рогівки є необхідним для визначення довжини її вертикального і горизонтального діаметрів, а також для обчислення середнього діаметра, за яким в подальшому нормують параметри інтерференційної картини.

На третьому етапі виконують розмітку контуру ізохром першого порядку на ІК з використанням регульованого кільцевого показчика, який дозволяє в кожному конкретному випадку визначити середину ширини ізохром і стандартизувати дослідження. Після розмітки контуру ізохром за допомоги сплайнів моделюють саму ізохрому. Якщо під час проведення візуального контролю виявлено розбіжність розміченого контуру і реальної картини, то коригують точки невідповідності і автоматично налаштовують контур ізохром.

На четвертому етапі здійснюють автоматизований підрахунок пікселів, що утворюють ізохрому і заповнюють її внутрішню частину, отримані значення нормують за середнім діаметром рогівки, що дозволяє виключити вплив масштабу зображення ІК і варіабельність розміру рогівки у різних пацієнтів.

## **КОНЦЕПЦІЯ ІНТЕРФЕЙСУ КОРИСТУВАЧА ПРОГРАМИ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ПАРАМЕТРИЗАЦІЇ ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНИХ КАРТИН**

Графічний інтерфейс користувача став стандартом для взаємодії між людиною і комп'ютерними системами. Введення текстових даних і команд поступилося місцем безпосередньому маніпулюванню візуалізованими даними і елементами інтерфейсу із застосуванням спеціалізованих об'єктів-показчиків (курсорів). Для цього використовують різні координатні пристрої — комп'ютерні миші, тачпади, сенсорні екрани.

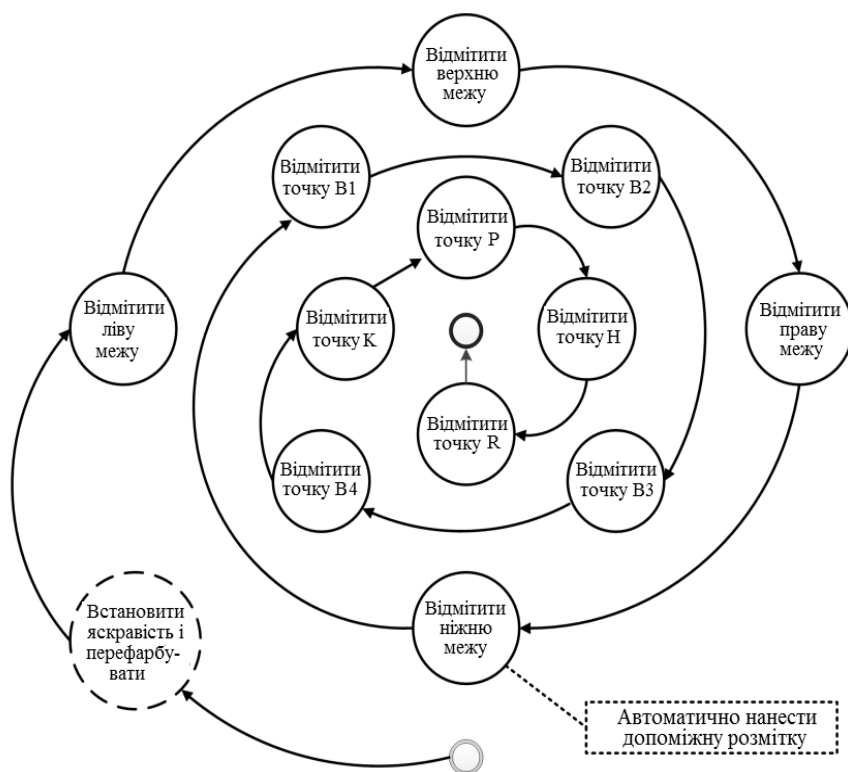


Рис. 3. Послідовність дій під час оброблення зображень ІК вручну

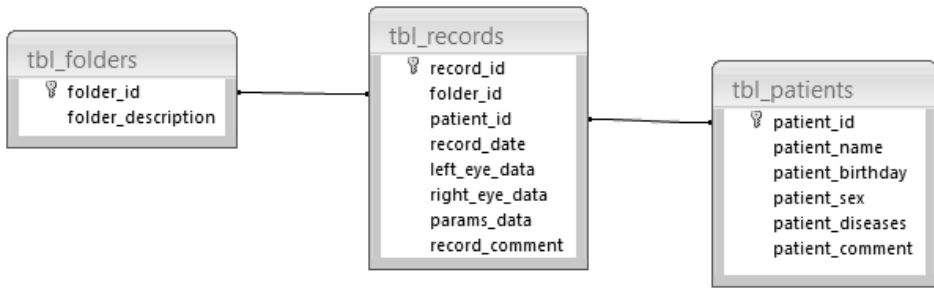
Спираючись на схему ІК (рис 1, б), етапи оброблення зображень можуть бути описані за такою послідовністю дій (рис. 3).

Для оброблення зображень ІК експерту-людині необхідно знайти і відмітити точки, що описують елементи ізоклін і ізохром. Якщо дотримуватися запропонованої послідовності дій, можна мінімізувати кількість переміщень покажчика (курсора) для переходу від однієї точки до іншої. Для досягнення максимальної швидкості автоматизованого оброблення зображень до алгоритму слід додати елементи інтерактивності, наприклад, автоматичні змінення поточної точки після натискання кнопки миші і нанесення допоміжної розмітки на зображення.

Як показали попередні дослідження, інформативними параметрами ІК є показники довжини відрізків діагоналей інтерференційного ромба, кути між ними, площа під ізохромою першого порядку і її довжина.

## СТРУКТУРА БАЗИ ДАНИХ

База даних (БД) ІК пацієнтів і результатів їх обстежень складається з трьох пов'язаних таблиць: `tbl_folders`, `tbl_patients`, `tbl_records`. Структуру зв'язків між таблицями в базі даних надано на рис. 4.



**Рис. 4.** Структура бази даних ІК і результатів обстежень пацієнтів

Таблиця `tbl_patients` містить базову інформацію про обстежуваних пацієнтів, розташовану в таких стовпцях:

`patient_id` — зберігає унікальний ідентифікатор обстежуваного, тип поля Лічильник, є первинним ключем; `patient_name` — зберігає ПІБ обстежуваного, тип Текстовий;

`patient_birthday` — зберігає дату народження обстежуваного, тип Дата / Час;

`patient_sex` — зберігає найменування статі обстежуваного, тип Текстовий;

`patient_diseases` — зберігає перелік основних захворювань обстежуваного, тип Текстовий;

`patient_comments` — зберігає додаткову інформацію про обстежуваного, тип Текстовий.

Таблиця `tbl_folders` — містить інформацію про умовні групи обстежень. Ця таблиця містить такі стовпці:

`folder_id` — зберігає унікальний ідентифікатор умовної групи обстеження, тип поля Лічильник, є первинним ключем;

`folder_description` — зберігає найменування умовної групи обстеження, тип Текстовий.

Таблиця `tbl_records` містить дані, отримані під час обстеження пацієнтів. Ця таблиця містить такі стовпці:

`record_id` — зберігає унікальний ідентифікатор обстеження, тип поля Лічильник, є первинним ключем;

`folder_id` — зберігає ідентифікатор умовної групової приналежності з таблиці `tbl_folders`, тип поля Числовий, є зовнішнім ключем;

`patient_id` — зберігає унікальний ідентифікатор обстежуваного з таблиці `tbl_patients`, тип поля Числовий, є зовнішнім ключем;

`record_date` — зберігає дату обстеження, тип Дата / Час;

`left_eye_data` — зберігає зображення інтерференційної картини лівого ока в форматі `bmp` (Bitmap Picture), тип поля «Поле об'єкта OLE»;

`right_eye_data` — зберігає зображення інтерференційної картини правого ока у форматі `bmp` (Bitmap Picture), тип поля «Поле об'єкта OLE»;

`params_data` — зберігає результати параметризації інтерференційної картини для лівого і правого очей в форматі `Xml`, тип поля Текстовий;

`record_comments` — зберігає додаткову інформацію про обстеження, тип Текстовий.

# ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ПАРАМЕТРИЗАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНИХ КАРТИН В АВТОМАТИЗОВАНОМУ ІНТЕРАКТИВНОМУ РЕЖИМІ

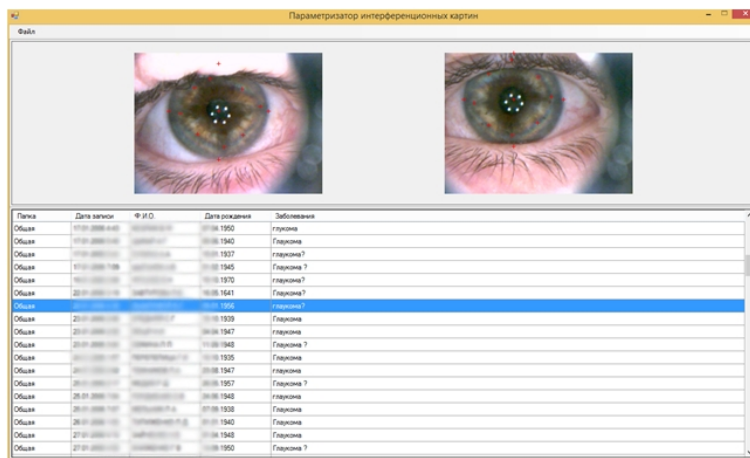
Програмне забезпечення параметризації ІК є класичним віконним застосунком операційної системи Microsoft Windows. Після запуску програми на екрані монітора буде відображено головне вікно програми (рис.5).

У верхній частині вікна програми знаходиться головне меню, а нижче розташовано область перегляду знімків і таблицю зі списком збережених в БД результатів обстежень.

Для вибору результатів обстеження конкретного пацієнта користувач повинен вибрати рядок з шуканим прізвищем, після чого з БД автоматично витягуються зображення лівого і правого очей і відображаються в області перегляду. Якщо знімки інтерференційних картин вже було параметризовано, то на них буде нанесено червоні маркери у відповідних точках.

Для доступу в БД використано технологію MicrosoftADO.NET, яка організовує роботу з табличними даними у застосунках, оснований на Microsoft .NETFramework. Ця технологія підтримує автономну роботу за допомоги спеціальних об'єктів DataSet, що є локальними копіями будь-якої кількості взаємопов'язаних таблиць даних, кожна з яких містить набір рядків і стовпців.

Об'єкти DataSet підтримують роботу зі своїм наповненням за допомоги відповідного адаптера даних, не вимагаючи підключення до джерела даних. Технологія ADO.NET подано у вигляді керованої кодової бібліотеки, що дозволяє мати доступ до даних за допомоги будь-якої мови .NET. Від інших API, ADO.NET відрізняє те, що вона не взаємодіє з системами керування базами даних безпосередньо. Замість цього використовують постачальники даних (dataproducer), які інкапсують механізм роботи з конкретною СКБД. Такий підхід є дуже гнучким, дозволяє створювати адаптери для будь-якої СКБД і повністю використовувати її особливості. Для роботи з БД Microsoft Access використовують вбудований провайдер .NET Framework Data Provider for OLEDB.



**Рис. 5.** Головне вікно ПЗ для параметризації інтерференційних картин

Для зберігання в БД знімків ІК, отриманих за допомоги камери і поляризаційної приставки, використано формат растрових зображень BMP. Такий формат використовують в операційних системах Microsoft Windows і його підтримує велика кількість програм. Він дає змогу зберігати одношарові растри, де кожен піксель зберігається у вигляді двовимірного масиву, відповідного безпосередньо значенням глибини кольору моделі RGB з підтримкою різної кількості біт (1–64 біт), таблиць кольорів (палітри). У бібліотеках класів .NET Framework для зберігання растрових зображень призначено клас Bitmap. Він реалізує методи читання даних від будь-якого джерела, який підтримує інтерфейс IStream (бази даних, структуровані сховища, блоки пам'яті тощо). У цьому разі аналізується формат даних і для розпакування використовують потрібний кодек. Прямую роботу з растровими даними здійснюють за допомоги додаткових класів:

- структура Color (для маніпулювання кольором окремих пікселів);
- BitmapData (для швидкого доступу до виділеної прямокутної області растра);
- клас ImageAttributes (для перетворення колірних просторів з використанням матричної алгебри).

Робота зі знімками ІК ведеться за допомоги контекстного меню (рис. 6), що відкривається після натискання правої кнопки миші на зображення в зоні перегляду.

Вибір відповідних пунктів контекстного меню «Розмаїття» дозволяє відкрити вікно розмітки знімка (рис. 7), повернути зображення на 180° за годинниковою стрілкою (якщо неправильно налаштували камеру поляризаційного приладу) і зберегти координати маркерів в БД.

Оскільки лінії інтерференційних картин на знімках мають різну товщину і розмиту межу, для підвищення точності і зручності їх параметризації використовують двохрановий покажчик. Вертикальна і горизонтальна лінія курсору дозволяє точно відзначати межу рогівки, а кільцевий покажчик зі змінним діаметром — точно вказувати на середину ізохроми та ізокліни.

Для роботи з зображеннями використовують бібліотеку класів GDI+, доступну в середовищі розроблення і виконання .NET Framework. Підсистема GDI+ реалізує можливості роботи з векторними, растровими зображеннями і шрифтами в операційних системах Windows і, починаючи з версії Windows XP, є їхніми складниками. Інтерфейс бібліотеки підтримує роботу з більшістю популярних форматів графічних файлів (bmp, gif, jpeg, png тощо). Контури допоміжної розмітки показано на рис. 8.

Для подання гладких контурів інтерференційних картин використовують сплайни (англ. Spline — лекало, дерев'яне або металеве пристосування для креслення кривих ліній), які широко застосовують в інженерних розрахунках для апроксимації результатів експериментів. Крива сплайна гладко (не утворюючи зламів і розривів) проходить через кожну точку з набору і може бути отримана за допомоги складних формул, заснованих на математичному описі поведінки гнучких стрижнів. У бібліотеці класів GDI+ є методи для побудови окремих сплайнів і згладжених замкнутих контурів (з можливістю заливки внутрішніх зон). Контури утворюються фундаментальним сплайном (англ. Cardinalspline) — послідовністю окремих кривих, об'єднаних в одну велику криву.

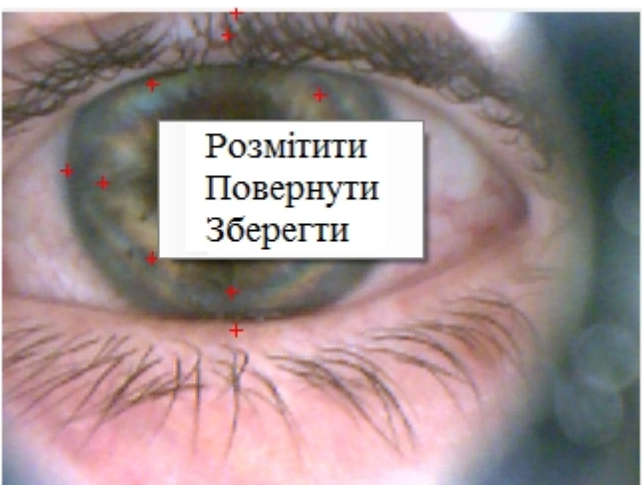


Рис. 6. Контекстне меню параметризації знімків ІК



Рис. 7. Режими покажчика (курсора) для оцінювання лівої та правої (а), нижньої та верхньої (б) меж рогівки і точок ізохром та ізоклін (в).



Рис. 8. Допоміжна розмітка інтерференційної картини по точкам ізоклін (а) і по контуру ізохром (б).

Для обчислення параметрів ІК (периметра і площі) використовують метод аналізу їх контурів. Підрахунок кількості пікселів, які становлять замкнутий контур обвідної ізохроми, дозволяє визначити її периметр (довжину), а кількість пікселів, які заповнюють внутрішню зону, — площу. Оскільки кількість пікселів зображення не є системною величиною, то для подальшого оброблення результатів отримані величини нормують за середнім діаметром рогівки. Для експортування отриманих даних в зовнішні програми використовують експорт в універсальний файл формату csv. Для цього в головному меню «Файл» вибирають пункт «Експортувати».

### **ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ І ЧАСУ ПАРАМЕТРИЗАЦІЇ ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНИХ КАРТИН В АВТОМАТИЗОВАНОМУ РЕЖИМІ**

За використання розробленого ПО роздільна здатність візуальної розмітки становить 1 піксель, середній діаметр вимірюваних рогівок — 182 пікселя, а діаметр кільцевого покажчика знаходиться у діапазоні від 7 до 11 пікселів. Якщо для переведення цих величин в системні одиниці прийняти за діаметр рогівки дорослої людини величину ( $10 \pm 0,56$ ) мм, то роздільна здатність становить 0,055 мм/піксель (10 мм / 182 пікселів).

Альтернативним способом параметризації ІК є ручний вимір параметрів за роздрукованими на папері фотографіями з використанням різних механічних лічильників довжини звивистих ліній, наприклад курвіметр. Цей пристрій використовують для визначення відстаней на топографічних картах, планах і кресленнях. Принцип його дії засновано на використанні спеціального тарованого (зубчастого) колеса, який прокочується по вимірюваній поверхні і є сполученим з лічильником оборотів. За відомого діаметру колеса прилад відображає на циферблаті (або електронному табло) пройдену відстань. Такий прилад, наприклад, курвіметр КУ-А, має межу вимірювання 100 см з роздільною здатністю 1 см і похибкою 0,25 см на 50 см шляху. Складністю використання курвіметра є ще й те, що ізохрома має товщину, тому необхідно дуже точно виміряти її внутрішній периметр, потім зовнішній і порахувати середній, а потім розрахувати площу під кривою з використанням різних математичних прийомів. Таке оброблення ІК є трудомістким, займає багато часу, має досить велику похибку.

Найдавніший спосіб параметризації інтерференційних картин засновано на проекції за допомоги фотозбільшувача зображення рогівки, отриманого в результаті фотозйомки, на поверхню масштабно-координатного паперу, розміченого на клітини (міліметрівка, розмір клітини 1x1 мм) [7, 8, 10, 11]. На спроектованому зображенні вручну відзначають опорні точки або олівцем повністю обводять ізохрому, а потім по клітках підраховують її площу і периметр. Під час проведення параметризації діаметр зображення рогівки був постійним і дорівнював 55 мм. Це забезпечувало граничну роздільну здатність 0,18 мм/клітина (10 мм/клітин, так як 1 клітина відповідає 1 мм) на зображенні діаметром 240 мм. Середній час оброблення одного зображення з визначенням площі і периметра ізохроми за описаним способом становив 15–20 хвилин. Такий підхід до параметризації ІК є недоцільним з практичної точки зору через свою крайню трудомісткість і тривалість.

В процесі оброблення знімків інтерференційних картин, збережених в БД, було проведено оцінювання часу, який витрачає експерт на автоматизовану параметризацію в інтерактивному режимі з використанням розробленого програмного забезпечення. Для цього один з експертів проводив параметризацію ІК, а його асистент з використанням секундоміра визначав час з моменту вибору одного запису (натискання лівої кнопки миші на рядок списку) до переходу до нового запису. Для вибірки з десяти записів середній час параметризації однієї ІК склав ( $77,3 \pm 25,5$ ) с. Після ознайомлення з принципом розмітки і установкою яскравості, а також отримання певних навичок, проведення параметризації двох знімків одного пацієнта за часом не перевищало 80 с.

### **СТРУКТУРА ТЕЛЕМЕДИЧНОЇ СИСТЕМИ ЕКСПРЕС-ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ ВНУТРІШНЬООЧНОГО ТИСКУ**

Основним чинником, який стримує широке впровадження методів дослідження напружено-деформованого стану очей в поляризованому світлі, є складність отримання якісних зображень ІК, оскільки для цього необхідні спеціальні оптичні пристрої і особлива система освітлення.

Для отримання знімків ІК в побутових умовах може бути використано спеціальний поляризаційний освітлювач (рис. 9), що поєднує необхідне джерело світла (1) і комплект поляризаційних фільтрів плівкового типу (2). Як джерело світла пропонується використовувати сучасні освітлювальні світлодіоди.

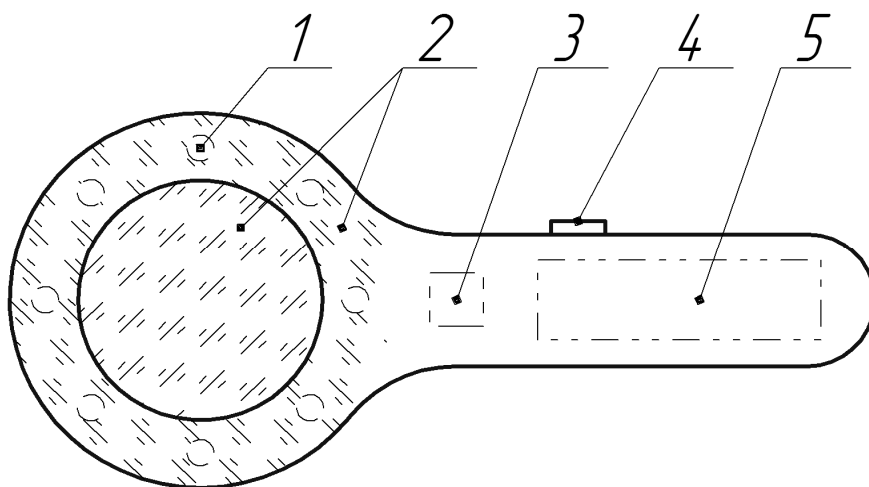
Для реєстрації знімків ІК роївки ока пропонується використовувати тилову камеру смартфонів, або, за необхідності, камери класичних телефонів, фото і веб камери. Конструкція освітлювача не вимагає складної оптичної системи, оскільки використовувані камери короткофокусні, а вбудоване джерело живлення (5) робить освітлювальний пристрій автономним.

Запропонований освітлювач спільно зі смартфоном і спеціальним мобільним застосунком за допомоги голосових інструкцій і підказок дозволить пацієнту самостійно отримати якісний знімок.

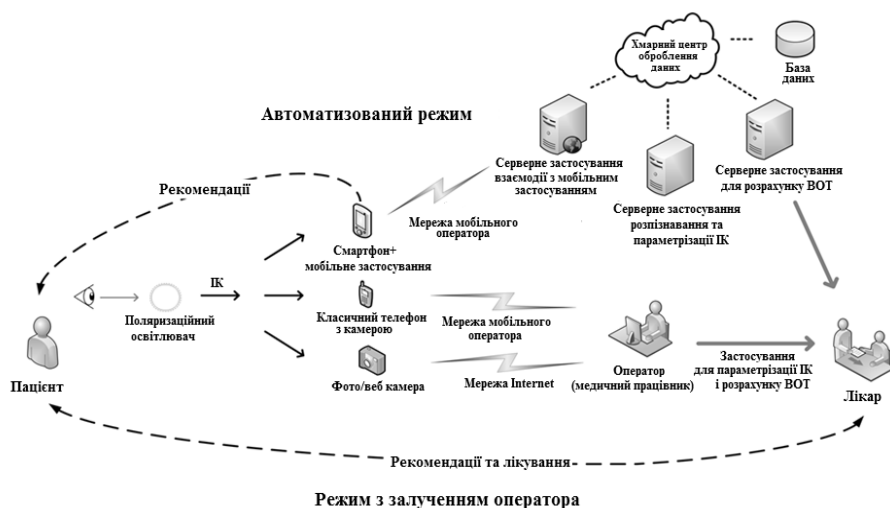
Оброблення отриманих знімків доцільно винести в хмарний центр оброблення даних (ЦОД), так як завдання повністю автоматизованого розпізнавання і параметризації ІК зображень досить ресурсномісткі, до того ж виникає необхідність надійного зберігання результатів, статистичного оброблення та адміністрування.

На рис. 10 зображено структуру телемедичної системи оцінювання та моніторингу рівня ВОТ з використанням технології аналізу ІК, які спостерігаються на роївці ока в поляризованому світлі. Технічна реалізація системи передбачає два режими роботи — автоматизований і з залученням оператора для визначення параметрів ІК.





**Рис. 9.** Конструкція поляризаційного освітлювача (1 — світлодіоди, 2 — поляризаційні фільтри, 3 — плата керування, 4 — кнопки керування, 5 — акумуляторна батарея)



**Рис. 10.** Структура телемедичної системи моніторингу рівня ВОТ з використанням технології аналізу ІК

При роботі в автоматизованому режимі пацієнт отримує зображення ІК за допомоги смартфона, оснащеного поляризаційно-освітлювальним блоком, і з каналів мобільного зв'язку направляє це зображення в ЦОД. У ЦОД відбувається параметризація зображення і визначення рівня ВОТ, або оцінювання попадання ВОТ в один з двох можливих інтервалів значень — норма (10–20 мм.рт. ст), вище норми (понад 20 мм.рт.ст) [18]. Якщо отримані внаслідок оброблення ІК значення ВОТ не потрапляють в інтервал норми, пацієнт повинен звернутися до лікаря для отримання консультації та відповідного лікування.

Інформація про рівень ВОР у такому режимі роботи системи буде надходити до лікаря і реєструватися у відповідній БД.

За другим режимом визначати параметри ІК і рівень ВОР буде оператор, він передає інформацію лікарю, який на основі отриманої інформації формує відповідні рекомендації пацієнтові. Таким чином, в цьому режимі передбачається особиста участь фахівців в параметризації ІК, оцінювання рівня ВОР і виробленні відповідних рекомендацій.

Слід зауважити, що подібні телемедичні системи, спрямовані на доклінічне тестування певних функцій організму, не можуть і не повинні замінювати візит до лікарів, тому галузь їх застосування повинна бути обмежена виробленням рекомендацій пацієнтові з приводу строків звернення до лікаря.

## **ВИСНОВКИ**

Дослідження рогівки ока в поляризованому світлі дозволяє візуалізувати внутрішні напруження в ній, що виникають через механічні впливи з боку екстраокулярних м'язів і внутрішньоочного тиску. Форма інтерференційної картини, яка спостерігається на рогівці ока, залежить від стану екстраокулярних м'язів і рівня внутрішньоочного тиску, що може бути використано для діагностики їх патології.

Для оцінювання рівня внутрішньоочного тиску хворих глаукомою з використанням інтерференційних картин необхідно визначати їх параметри, що може бути виконано в автоматизованому режимі з використанням розробленого методу та програмного забезпечення.

Для реалізації методу параметризації зображення інтерференційних картин знімок перетворюють з повнокольорового RGB оригіналу в копію, подану у відтінках сірого кольору. На зображення наносяться контрольні точки, які відмічають контури рогівки і ізохром, з використанням дворежимного (лінійного і кільцевого) покажчика, ізохрома моделюється за точками контуру відповідними сплайнами, проводять візуальний контроль отриманого зображення і, за необхідністю, його корекцію, після чого автоматично підраховується кількість пікселів, що утворюють ізодрому (периметр), а також заповнюють її внутрішню площу.

Показано, що запропонований метод забезпечує роздільну здатність не гірше 0,55 мм/піксель (в три рази краще за відомі) і в 11–15 разів скорочує час параметризації інтерференційних картин, не є трудомістким і може бути реалізовано в умовах центральної районної лікарні.

Телемедичну систему експрес-оцінювання рівня внутрішньоочного тиску може бути реалізовано на базі смартфона, оснащеного поляризаційно-освітлювальним блоком і спеціальним мобільним застосунком, з використанням мобільних мереж або Інтернет. Передбачається два режими роботи системи — автоматизований, на базі хмарних обчислень, і з участю медичних працівників.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Рыков С.А., Витовская О.П., Степанюк Г.И. Заболеваемость, распространенность офтальмопатологии и инвалидность вследствие нее в Украине. *Новости глаукомы*. 2009. № 1. 34–35.
2. Водовозов А.М., Ковылин В.В. Использование поляризационно-оптического метода для диагностики состояния глазодвигательных мышц при вертикальной девиации. *Офтальмологический журнал*. 1990. № 4. С. 201–204.
3. Спосіб виміру внутрішньоочного тиску: пат. 33640 Україна: МПК А 61 В 3/16, А 61 В 8/10. №и 2007 11716; заявл. 23.10.2008; опубл. 10.07.2008, Бюл. № 13. 4 с.
4. Кочина М.Л., Калиманов В.Г. Методы обработки изображений для автоматизации диагностики патологии экстраокулярных мышц. *Прикладная радиоэлектроника*. 2008. Т. 7, № 1. С. 93–96.
5. Кочина М.Л., Каплин И.В., Ковтун Н.М. Результаты использования поляризованного света для исследования глаза. *Вест. проблем биологии и медицины*. 2014. Вып. 4, Т. 1 (113). С. 139–145.
6. Пеньков М.А., Кочина М.Л. Интерференционный метод в диагностике косоглазия. *Офтальмологический журнал*. 1979. № 8. С. 497–498.
7. Пеньков М.А., Кочина М.Л. Интерференционный метод в диагностике косоглазия. *Вест. офтальмологии*. 1981. № 1. С. 39–41.
8. Пеньков М.А., Кочина М.Л. Применение поляризованного света в офтальмологии (обзор). *Офтальмологический журнал*. 1981. № 6. С. 368–372.
9. Пеньков М.А., Тамарова Р.М., Кочина М.Л. Поляризационный метод исследования роговицы глаза. *Новости мед. техн.: сборник статей*. Москва, 1982. Вып. 1. С. 27–30.
10. Zandman F. The photoelastic effect of the living eye. *Experim. Mechanics*. 1966. Vol. 6, № 5. P. 19–25.
11. Bour L.J., Lopez Cardozo N.J. On the birefringence of the living human eye. *Vision Res*. 1981. Vol. 21, № 9. P. 1413–1421.
12. Komai Y., Ushiki T. The three dimensional organization of collagen fibrils in the human cornea and sclera. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci*. 1991. Vol. 32, № 8, P. 2244–2257.
13. Stanworth A., Naylor E.J. Polarized light studies of the cornea I. The isolated cornea. *J. Exp. Biol*. 1953. Vol. 30. P. 160–163.
14. Пеньков М.А., Кочина М.Л. Способ диагностики патологии внутриглазного давления. *Офтальмологический журнал*. 1981. №8. С. 476–479.
15. Cogan D. C. Some ocular phenomena produced with polarized light. *Arch. Ophthalmol*. 1941. Vol. 25, № 3. P. 391–400.
16. Cope W.T., Wolbarsht M.L., Yamanashi B.S. The corneal polarization cross. *J. Opt. Soc. Am*. 1978. Vol. 68, № 8. P. 1139–1141.
17. Anderson K., El-Sheikh A., Newson T. Application of structural analysis to the mechanical behavior of the cornea. *J. R. Soc. Interface*. 2004. Vol. 1. P. 1–15.
18. Кочина М.Л., Калиманов В.Г. Исследование и моделирование поляризационно-оптических свойств роговицы глаза при различных состояниях экстраокулярных мышц. *Бионика интеллекта*. 2008. № 2 (69). С. 132–137.
19. Shaffer R.N., Lieberman M.F., Drake M.V. *Becker-Shaffer's Diagnosis and Therapy of the Glaucomas*. Mosby, 1999. 716 p.
20. Rao H.L., Senthil S., Garudadri C.S. Contralateral intraocular pressure lowering effect of prostaglandin analogues. *Indian J Ophthalmol*, 2014. Vol. 62. P. 575–579.

Отримано 30.11.2017

## REFERENCES

1. Rykov S.A., Vitovskaya O.P., Stepaniuk G.I. Morbidity, prevalence of ophthalmopathology and disability due to it in Ukraine. *News of Glaucoma*. 2009. № 1. P. 34–35 (in Russian).
2. Vodovozov A.M., Kovylin V.V. Use of the polarization-optical method for diagnosing the state of oculomotor muscles with vertical deviation. *Ophthalmological Journal*. 1990. № 4. P. 201–204 (in Russian).

3. Method of intraocular pressure measurement: pat. 33640, Ukraine: IPC A 61 V 3/16, A 61 V 8/10. №u 2007 11716; claimed 23.10.2008; published 10.07.2008 Bull. № 13. 4 p.
4. Kochina M.L., Kalimanov V.G. Methods of image processing for automation of pathology diagnosis of extraocular muscles. *Applied Radioelectronics*. 2008. Vol. 7, № 1. P. 93–96 (in Russian).
5. Kochina M.L., Kaplin I.V., Kovtun N.M. Results of polarized light using in the eye studying. *Bulletin on the Problems of Biology and Medicine-2014*. Iss. 4, vol. 1 (113). P. 139–145 (in Russian).
6. Penkov M.A., Kochina M.L. Interference method in the diagnosis of strabismus. *Ophthalmological Journal*. 1979. № 8. P. 497–498 (in Russian).
7. Penkov M.A., Kochina M.L. Interference method in the diagnosis of strabismus. *Bulletin of Ophthalmology*. 1981. № 1. P. 39–41 (in Russian).
8. Penkov M.A., Kochina M.L. Application of polarized light in ophthalmology (review). *Ophthalmological Journal*. 1981. № 6. P. 368–372 (in Russian).
9. Penkov M.A., Tamarova R.M., Kochina M.L. Polarization method of studying the eye cornea. *News of Medical Technology: a collection of articles*. Moscow, 1982. Iss. 1. P. 27–30 (in Russian).
10. Zandman F. The photoelastic effect of the living eye. *Experim. Mechanics*. 1966. Vol. 6, № 5. P. 19–25.
11. Bour L.J., Lopez Cardozo N.J. On the birefringence of the living human eye. *Vision Res*. 1981. Vol. 21, № 9. P. 1413–1421.
12. Komai Y., Ushiki T. The three dimensional organization of collagen fibrils in the human cornea and sclera. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci*. 1991. Vol. 32, № 8. P. 2244–2257.
13. Stanworth A., Naylor E.J. Polarized light studies of the cornea. The isolated cornea. *J. Exp. Biol*. 1953. Vol. 30. P. 160–163.
14. Penkov M.A., Kochina M.L. Method of diagnosing the pathology of intraocular pressure. *Ophthalmological Journal*. 1981. № 8. P. 476–479 (in Russian).
15. Cogan D.C. Some ocular phenomena produced with polarized light. *Arch. Ophthalmol*. 1941. Vol. 25, № 3. P. 391–400.
16. Cope W.T., Wolbarsht M.L., Yamanashi B.S. The corneal polarization cross. *J. Opt. Soc. Am*. 1978. Vol. 68, № 8. P. 1139–1141.
17. Anderson K., El-Sheikh A., Newson T. Application of structural analysis to the mechanical behavior of the cornea. *J.R. Soc. Interface*. 2004. Vol. 1. P. 1–15.
18. Kochina M.L., Kalimanov V.G. Investigation and modeling of the polarization-optical properties of the eye cornea in various states of extraocular muscles. *Bionics of the intelligence*. 2008. № 2 (69). P. 132–137 (in Russian).
19. Shaffer R.N., Lieberman M. F., Drake M.V. Becker-Shaffer's Diagnosis and Therapy of the Glaucomas. Mosby, 1999. 716 p. № 1. P. 34–35.
20. Rao H.L., Senthil S., Garudadri C.S. Contralateral intraocular pressure lowering effect of prostaglandin analogues. *Indian J Ophthalmol*, 2014. Vol. 62. P. 575–579.

Received 30.11.2017

И.В. Каплин<sup>1</sup>, врач-офтальмолог Киевского центра терапии и микрохирургии глаза, аспирант кафедры офтальмологии  
e-mail: smashdown@mail.ru

М.Л. Кочина<sup>2</sup>, д-р. биол. наук, проф., зав. кафедрой медико-биологических основ спорта и физической реабилитации  
e-mail: kochinaml@gmail.com

А.Г. Фирсов<sup>3</sup>, канд. техн. наук, главный конструктор  
e-mail: shagrath.hire@gmail.com

<sup>1</sup> Харьковская медицинская академия последипломного образования,

ул. Амосова, 58, 61000, г. Харьков, Украина

<sup>2</sup> Черноморский национальный университет им. Петра Могилы,

ул. 68 Десантников, 10, 54000, г. Николаев, Украина

<sup>3</sup> ООО «АСТЕР-АЙТИ»,

ул. Авиационная, 1, к.7, 61166, г. Харьков, Украина

## КОНЦЕПЦИЯ ТЕЛЕМЕДИЦИНСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ УРОВНЯ ВНУТРИГЛАЗНОГО ДАВЛЕНИЯ

Предложена концепция телемедицинской системы экспресс-оценки уровня внутриглазного давления, основанной на анализе параметров интерференционных картин, наблюдаемых на роговице живого глаза в поляризованном свете. Представлены результаты разработки метода определения параметров интерференционных картин в автоматизированном режиме с использованием разработанного программного обеспечения, двухрежимного (линейного и кольцевого) указателей точек изохром. Периметр изохромы автоматически определяется путем подсчета количества пикселей на ее замкнутом контуре, площадь — путем подсчета количества пикселей, заполняющих ее внутреннюю область.

**Ключевые слова:** телемедицинская система, поляризованный свет, интерференционные картины, изохромы, параметризация.

I.V. Kaplin<sup>1</sup>, Ophthalmologist of the Kyiv Center of Therapy and Microsurgery of Eye,  
Postgraduate Student of Ophthalmology Department  
e-mail: smashdown@mail.ru

M.L. Kochina<sup>2</sup>, Dr (Biology), Professor,  
Head of Department of Medical and Biological Bases of Sport and Physical Rehabilitation  
e-mail: kochinaml@gmail.com

A.G. Firsov<sup>3</sup>, PhD (Engineering),  
Main Designer of LLC "ASTER-IT"  
e-mail: shagrath.hire@gmail.com

<sup>1</sup> Kharkov Medical Academy of Postgraduate Education,

Amosov st, 58, Kharkiv, 61000, Ukraine

<sup>2</sup> Petro Mohyla Black Sea National University,

68 Marines st., 10, Mykolay, 54003, Ukraine

<sup>3</sup> Limit Liability Company "ASTER-IT",

Aviation st., 1, ap. 7, Kharkov, 61166, Ukraine

## THE CONCEPTION OF TELEMEDICINE SYSTEM FOR EXPRESS ESTIMATION OF INTRAOCULAR PRESSURE'S LEVEL

**Introduction.** One of the reasons for the unfavorable outcome of glaucoma is an incorrect evaluation of the eye hydrodynamics data obtained by measuring intraocular pressure. That is why the development of new non-invasive methods of intraocular pressure studying is an urgent task.

The cornea is optically anisotropic due to the effects of direct extraocular muscles and intraocular pressure on it, as well as the structure and properties of corneal collagen. When an eye cornea is illuminated by polarized light, we can observe an interference pattern which reflects the distribution of internal stresses in it. The parameters of interference patterns depend on the level of intraocular pressure.

**The purpose** of the article is to develop the telemedicine system's conception for express estimation of intraocular pressure level with the use of interference pictures that are observed on glaucoma patients' cornea in polarized light.

**Results.** The method for determining the interference parameters is performed in several stages in accordance with the developed algorithm. First, after receiving a color picture of interference pattern, its brightness is normalized and converted to monochrome.

At the second stage, the cornea borders are fixed by means of two mode indicators, after which the contour is automatically applied to the image.

At the third stage, the isochromatic contour is labeled using an adjustable ring pointer, which allows defining the isochrome width middle and standardizing the studies. After marking out the contour of the isochrome using splines, the isochrome itself is modeled.

At the fourth stage, there is an automated calculation of the pixels forming the isochrome and filling the inner part.

**Conclusions.** To assess the level of intraocular pressure using interference patterns, it is necessary to determine their parameters, which can be performed in a semi-automated mode.

The developed method provides a resolving power of at least 0.55 mm/pixel (3 times better than the known one) and reduces the research time by 11–15 times. It is not labor-intensive and can be implemented in the central regional hospital.

**Keywords:** *telemedical system, polarized light, interference patterns, isochromes, parametrization.*

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

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

### Требования к рукописям статей

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

К рукописи прилагаются:

- аннотации — на русском и украинском языках (УДК, фамилия, инициалы автора/ов, название статьи, 5—6 строк текста, ключевые слова), на английском языке (фамилия, инициалы автора/ов, место работы, город, страна, название статьи, текст от 250 слов, с выделением рубрик: введение, цель, результаты, выводы, ключевые слова);

- лицензионный договор;

- сведения об авторе/ах на русском, украинском и английском языках должны включать: ФИО, ученую степень, научное звание, должность, отдел, место работы, почтовый адрес организации, телефон (служ., моб., дом.), E-mail, авторские идентификаторы ORCID или ResearcherID.

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

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

### Структура статьи

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

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

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

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

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

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

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

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

## **Требования к текстовому файлу**

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

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

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

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

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

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

В розничную продажу журнал не поступает.

***Оформление подписки для желающих опубликовать статьи в нашем журнале обязательно.***

**Подписка осуществляется:**

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