

Cybernetics and Computer Engineering **4 (202)/2020**

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

CONTENTS

Informatics and Information Technologies

- АНІСІМОВ А.В., ЗАВАДСЬКИЙ І.О., ЧУДАКОВ Т.С. Застосування мульти-роздільникових кодів до архівування природномовних текстів 5
- SUROVTSEV I.V., VELYKYI P.Yu., GALIMOVA V.M., SARKISOVA M.V. Ionometric Method for Determination of Concentrations of Microelements in Research of Digital Medicine 25

Intelligent Control and Systems

- ODARCHENKO R.S., VOLKOV O.Ye., SIMAKHIN V.M., GOSPODARCHUK O.Yu. Technology of Intelligent Control of Unmanned Aerial Vehicles Monitoring in the Airspace Using 5G Cellular Networks 44

Medical and Biological Cybernetics

- ANTOMONOV M.Yu. Imitation of Compensator and Adaptive Processes in Biosystems 57
- ЛЯБАХ К.Г., ДУХНОВСЬКА К.К. Інформаційна технологія вивчення кисневого режиму м'язової клітини 73

- System Index of Articles Published in 2020** 89

- To Attention of Authors** 91
-

Cybernetics and Computer Engineering **4 (202)/2020**

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

CONTENTS

Informatics and Information Technologies

- ANISIMOV A.V., ZAVADSKYI I.O., CHUDAKOV T.S. Application of Multi-Delimiter Codes to Natural Language Text Archiving 5
- SUROVTSEV I.V., VELYKYI P.Yu., GALIMOVA V.M., SARKISOVA M.V. Ionometric Method for Determination of Concentrations of Microelements in Research of Digital Medicine 25

Intelligent Control and Systems

- ODARCHENKO R.S., VOLKOV O.Ye., SIMAKHIN V.M., GOSPODARCHUK O.Yu. Technology of Intelligent Control of Unmanned Aerial Vehicles Monitoring in the Airspace Using 5G Cellular Networks 44

Medical and Biological Cybernetics

- ANTOMONOV M.Yu. Imitation of Compensator and Adaptive Processes in Biosystems 57
- LYABAKH K.G., DUKHNOVSKA K.K. Information Technology for Studying the Oxygen Regime of Muscle Cell 73

- System Index of Articles Published in 2020** 89

- To Attention of Authors** 91
-

Кібернетика 4 (202)/2020 та обчислювальна техніка

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

ЗМІСТ

Інформатика та інформаційні технології

- АНІСІМОВ А.В., ЗАВАДСЬКИЙ І.О., ЧУДАКОВ Т.С. Застосування мульти-роздільникових кодів до архівування природномовних текстів 5
- СУРОВЦЕВ І.В., ВЕЛИКИЙ П.Ю., ГАЛІМОВА В.М., САРКІСОВА М.В. Іонометричний метод визначення концентрацій мікроелементів у дослідженнях цифрової медицини 25

Інтелектуальне керування та системи

- ОДАРЧЕНКО Р.С., ВОЛКОВ О.Є., СІМАХІН В.М., СЕМЕНОГ Р.В., ГОСПОДАРЧУК О.Ю. Технологія інтелектуального керування моніторингом безпілотних літальних апаратів у повітряному просторі з використанням стільникових мереж 5G 44

Медична та біологічна кібернетика

- АНТОМОНОВ М.Ю. Моделювання компенсаторно-приспосувальних процесів у біосистемах 57
- ЛЯБАХ К.Г., ДУХНОВСЬКА К.К. Інформаційна технологія вивчення кисневого режиму м'язової клітини 73

- Системний показник статей, опублікованих у 2020 році** 89

- До уваги авторів** 91

Informatics and Information Technologies

DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt202.04.005>

UDC: 519.72

АНІСІМОВ А.В., д-р. фіз.-мат. наук, член.-кор. НАН України,
декан факультету комп'ютерних наук та кібернетики
e-mail: anatoly.v.anisimov@gmail.com

ЗАВАДСЬКИЙ І.О., д-р. фіз.-мат. наук, доцент,
доцент каф-ри математичної інформатики
e-mail: ihorza@gmail.com

ЧУДАКОВ Т.С., студент
e-mail: timofey.chudakov@gmail.com

Факультет комп'ютерних наук та кібернетики
Київського національного університету імені Тараса Шевченка,
4д, пр. Глушкова, 03022, Київ, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ МУЛЬТИРОЗДІЛЬНИКОВИХ КОДІВ ДО АРХІВУВАННЯ ПРИРОДНОМОВНИХ ТЕКСТІВ

***Вступ.** Рівень ефективності сучасних архіваторів наблизився до теоретичної межі. Покращення коефіцієнту стиснення певного виду даних навіть на частки відсотка, у разі збереження розумного часу стисання й розпакування, вважається істотним досягненням. Актуальність цього дослідження визначається тим, що запропоновано новий спосіб кодування даних, який, зокрема, дає можливість досягти значно суттєвішого підвищення коефіцієнту стиснення текстів англійською та німецькою мовами.*

***Метою** статті є вирішення проблеми немонотонності словника мультироздільникових кодів та дослідження доцільності використання мультироздільникового кодування на стадії попереднього оброблення природномовних текстів у процесі їхнього архівування.*

***Результати.** Введено поняття реверсного мультироздільникового коду. Побудовано монотонне кодувальне, а також декодувальне відображення з множини натуральних чисел на множину кодових слів реверсного мультироздільникового коду. Досліджено ефективність застосування реверсних мультироздільникових кодів до стисання природномовних текстів. Запропоновано механізм оптимізації використання словника у процесі архівування природномовних текстів. Проведено експерименти, результати яких свідчать, що попереднє кодування англійських та німецьких текстів реверсними мультироздільниковими кодами та застосування запропонованого методу оптимізації словника дає змогу на 1–3% покращити граничну ефективність стисання, яка досягається найкращими архіваторами в режимі максимального стиснення.*

© АНІСІМОВ А.В., ЗАВАДСЬКИЙ І.О., ЧУДАКОВ Т.С., 2020

ISSN 2663-2586 (Online), ISSN 2663-2578 (Print). Сyb. and comp. eng. 2020. № 4 (202)

Висновки. *Реверсні мультироздільникові коди є ефективним засобом стиснення природномовних текстів, що, у разі окремого застосування, характеризується стійкістю до помилок, дає можливість виконувати пошук інформації у стисненому файлі, а також надає можливість його швидкого декодування. У разі застосування як засобу попереднього оброблення природномовного тексту для подальшого архівування, разом зі спеціальними механізмами оптимізації словника, реверсні мультироздільникові коди дають можливість підвищити ефективність найкращих з відомих на сьогодні архіваторів.*

Ключові слова: *стискання, стиснення, архівування, стискальні коди, мультироздільниковий код, реверсний мультироздільниковий код, оптимізація словника, природномовний текст.*

ВСТУП

Методи стискання даних можна поділити на два великі класи: методи стискання з втратами інформації та без таких втрат. Основною перевагою стискання з втратами є, як правило, значно вищий ступінь стиснення, а недоліком — неможливість відновити вхідне повідомлення без викривлень.

Для багатьох типів даних, таких як відео, звук, зображення, невеликий рівень викривлень може бути цілком допустимим і навіть непомітним для користувача. Однак до таких даних не належать тексти, записані природною мовою або мовою програмування. Тому стискання текстів — це одна з найважливіших сфер застосування методів стискання без втрат даних. Іншою, не менш важливою, сферою є універсальні архіватори, які повинні відновлювати інформацію без викривлень. Це дослідження знаходиться на перетині цих двох сфер, адже його метою є пошук способів покращити ефективність архіваторів у разі їхнього застосування до стискання природномовних текстів.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Стискання без втрат даних є добре дослідженою галуззю кібернетики. Згідно з класифікацією, наведеною в [1], майже всі відомі методи у цій галузі можна поділити на 4 різновиди залежно від того, фіксованою чи змінною є довжина кодованого повідомлення та відповідного йому коду.

1. Коди типу «стала-стала» перетворюють частини вхідного повідомлення фіксованої довжини на блоки коду фіксованої (найчастіше — такої саме) довжини. Власне, йдеться не про стискальні коди, а про допоміжні перетворення, що переставляють або перенумеровують символи вхідного повідомлення так, що подальше застосування методів стискального кодування стає ефективнішим. Одним з найвідоміших таких перетворень є перетворення Барроуза-Віллера [2], яке вкупі з перетворенням «перемістити на початок» (MTF, Move-To-Front) [3] використовується як початковий етап стискання в багатьох архіваторах та форматах даних.

2. Коди типу «стала-змінна» є найпоширенішими. Як правило, це методи частотного кодування. Вони кожному символу вхідного алфавіту ставлять у відповідність послідовність символів коду (кодове слово) змінної довжини. Як правило, метод кодування побудовано таким чином, що символам з вищою частотою надаються коротші кодові слова. До цього класу кодів, зокрема, належать коди Гаффмана [4], патерн-коди [5], серед

яких найвідомішими є коди Фібоначчі [6], та нещодавно запропоновані мультироздільникові коди [7]. Зазначимо, що термін «символ вхідного алфавіту» є певною абстракцією, деякою атомарною з огляду на метод кодування одиницею, яка насправді може складатися зі змінної кількості літер, цифр тощо. Наприклад, коли ми застосовуємо мультироздільникові коди до стискання природномовних текстів, символом вхідного алфавіту вважаємо слово, тобто послідовність символів між двома пробілами — такий підхід є суттєво ефективнішим за кодування окремих літер.

3. Якщо у методі кодування враховується внутрішня структура символів алфавіту, отримуємо коди типу «змінна-змінна», тобто коди, у яких повідомленням змінної довжини відповідають кодові слова змінної довжини. Такими є всі коди, що кодують послідовності чисел, базуючись лише на їхніх значеннях, зокрема коди Елайеса [8] і Голомба [9]. Водночас фактичні частоти чисел у повідомленні, що передається, не враховуються, однак робиться певне припущення про загальний закон їхнього розподілу, зокрема в усіх відомих випадках припускається, що менші числа мають вищі частоти. Інколи код можна віднести до цього або попереднього класу, лише проаналізувавши метод кодування. Зокрема, метод кодування кодів Фібоначчі, викладений у [10], та методи кодування мультироздільникових кодів [7] ставлять кодові слова у відповідність натуральним числам, а отже, дають змогу розглядати ці коди, як коди типу «змінна-змінна».

4. Коди типу «змінна-стала» перетворюють послідовності символів вхідного повідомлення змінної довжини на кодові слова фіксованої довжини. Найвідомішим представником кодів цього типу є коди родини Лемпеля-Зіва [11] та їхні вдосконалення [12]. Їхня ефективність базується на використанні інформації не лише про частоти окремих символів, але й про частоти послідовностей символів.

Основним показником якості архіватора є коефіцієнт стиснення, тобто відношення обсягів початкових файлів до обсягів стиснутих на тому чи іншому наборі даних. Високих коефіцієнтів стиснення, характерних для сучасних архіваторів, як правило, вдається досягти лише завдяки поєднанню методів 1, 2 і 4 типів, а також застосуванню модифікацій арифметичного кодування [13], яке не можна віднести до жодного з перелічених класів кодів, але яке забезпечує максимально високий коефіцієнт стиснення. Водночас арифметичне кодування має численні недоліки:

- нестійкість до помилок у закодованому повідомленні;
- неможливість пошуку даних у закодованому файлі;
- повільність декодування (у десятки разів повільніше порівняно з кодами Гаффмана);
- відносна складність реалізації.

Поєднати стискальну ефективність арифметичного кодування зі швидкістю декодування, порівняною зі швидкістю декодування кодів Гаффмана, вдалося завдяки кодуванню, яке базується на понятті асиметричних систем числення (ANS) [14], однак усі інші з перелічених недоліків залишаються властивими і для цього методу, а також для кодів Гаффмана і Лемпеля-Зіва.

Коди типу 3 («змінна-змінна») у стисканні природномовних текстів використовуються рідше, оскільки забезпечують коефіцієнт стиснення гірший,

ніж коди типу 2 або 4. Однак саме до цього класу належать коди, що не мають, як показано в [7], жодного з перелічених вище недоліків — мультироздільникові коди. Зниження коефіцієнта стиснення для цих кодів у багатьох випадках може розглядатися як цілком прийнятне — 2–4 % порівняно з арифметичним кодуванням.

Проте мультироздільникові коди мають інший істотний недолік — немонотонність словника. Цю проблему детально досліджено далі. Також запропоновано модифікацію мультироздільникових кодів — реверсні мультироздільникові коди, які усувають згадану проблему, зберігаючи всі переваги «прямих» мультироздільникових кодів. Однак, мабуть, найцікавішими результатами цього дослідження є експериментальні дані. Вони свідчать про те, що якість стиснення природномовних текстів архіватором може бути покращено, якщо спочатку закодувати текст «недостатньо потужним» реверсним мультироздільниковим кодом, а вже потім заархівувати отриманий файл. Але цього вдається досягти, лише якщо виконати певне передоброблення словника, яке можна класифікувати як метод типу 1, «стала-стала».

МУЛЬТИРОЗДІЛЬНИКОВІ КОДИ І ПРОБЛЕМА НЕМОНОТОННОСТІ СЛОВНИКА

Припустимо, що $M = \{m_1, \dots, m_i\}$ — послідовність цілих чисел, яка зростає: $0 < m_1 < \dots < m_i$. Дано означення мультироздільникового коду коду D_M , позначаючи через 1^x послідовність з x одиничних бітів.

Означення 1. Мультироздільниковим кодом називають код D_M , який містить усі слова вигляду $1^{\alpha}0$, $\alpha \in M$, і всі слова, що задовольняють таким умовам:

- слово не починається з послідовності $1^{\alpha}0$, $\alpha \in M$;
- слово закінчується послідовністю $1^{\alpha}0$, $\alpha \in M$;
- слово не містить послідовності $1^{\alpha}0$, $\alpha \in M$ ніде, крім закінчення.

Разом з патерн-кодами [5], мультироздільникові коди належать до класу кодів з роздільниками — спеціальними послідовностями бітів, якими закінчуються всі кодові слова, але які не можуть трапитися всередині кодових слів. Кожен патерн-код має один роздільник, а мультироздільникові коди можуть мати їх кілька — це і є характерною рисою, що вирізняє такі коди з-поміж усіх інших. Точніше, роздільниками у коді D_M є послідовності вигляду $01^{\alpha}0$, $\alpha \in M$, однак код містить також слова вигляду $1^{\alpha}0$, $\alpha \in M$, які утворюють роздільник разом з останнім нулем попереднього кодового слова у закодованому тексті. У [15] пояснено, які переваги має така структура кодових слів порівняно з іншими відомими патерн-кодами, такими як коди Фібоначчі, а у [7] доведено такі теоретичні властивості мультироздільникових кодів, як універсальність та повнота, обчислено їхню асимптотичну щільність, описано методи кодування та декодування, а також експериментально досліджено ефективність цих кодів у стисканні природномовних текстів.

Що стосується кодування/декодування мультироздільникових кодів, то ці процедури може бути описано схемою, характерною для всіх методів типу 2 і 3, згідно з наведеною вище класифікацією. А саме, під час кодування використовується **словник** (слово тексту, кодове слово), у

якому слова тексту відсортовано за спаданням частот, а кодові слова відсортовано за зростанням довжин. Під час декодування застосовується зворотна процедура: потрібно побудувати відображення з множини кодових слів на множину слів тексту. З метою часової оптимізації декодування слова вихідного тексту варто зберігати за допомогою структури даних, що забезпечує швидкий доступ до своїх елементів, а найефективнішою з таких структур є масив із числовими індексами. Тоді декодувальне відображення фактично діятиме з множини кодових слів на множину натуральних чисел. Його вважатимемо зворотним і позначимо як ψ^{-1} , а пряме відображення, яке позначимо через ψ , діятиме з множини натуральних чисел на множину кодових слів.

У [7] описано пряме ψ та зворотне відображення ψ^{-1} для мультироздільникових кодів. Однак відображення ψ має той недолік, що довжини кодових слів $\psi(1), \psi(2), \dots$, які відповідають послідовним натуральним числам, не впорядковано за зростанням. Тому слова тексту w_i у згаданому вище словнику мають бути розташовані не в порядку зниження їхніх частот $p(w_i)$. Це не є проблемою, оскільки можна сформулювати простий принцип розташування слів тексту в словнику: якщо першим i елементам впорядкованої за спаданням частот послідовності слів $\{w_i\}$ вже поставлено у відповідність певну множину кодових слів, то слову вхідного тексту w_{i+1} ставимо у відповідність будь-яке з найкоротших кодових слів, що не належать цій множині. Проте проблема полягає в тому, що кодові слова $\psi(1), \dots, \psi(n)$ не утворюють множини n найкоротших кодових слів, а значить, масив слів тексту з індексами $\psi^{-1}(c_1), \dots, \psi^{-1}(c_n)$, де c_1, \dots, c_n — n найкоротших кодових слів, буде розрідженим. Навіть більше, як показано у [16], розмір цього масиву зростатиме експоненційно залежно від n , а саме не менш ніж у $O\left((1+\varepsilon)^{(n-2)/(m_1+1)}\right)$ разів, де величина ε залежить від асимптотичної щільності коду і перебуває в діапазоні від 0,65 до 0,85.

Звичайно, таке суттєве зростання обсягу словника обмежує область застосування кодів лише порівняно невеликими текстами. У [17] розглянуто кілька обхідних шляхів вирішення цієї проблеми, однак найкращим варіантом було б конструювання інших алгоритмів кодування та декодування мультироздільникових кодів, згідно з якими зростаюча послідовність натуральних чисел відображалася б у послідовність кодових слів неспадної довжини. Цю можливість ми і дослідимо далі, навівши спочатку означення монотонного відображення множини натуральних чисел на множину кодових слів.

Означення 2. Відображення ψ множини натуральних чисел на множину слів коду S називатимемо *монотонним*, якщо для будь-яких натуральних чисел a і b , таких, що $a < b$, виконується нерівність $|\psi(a)| \leq |\psi(b)|$.

(Тут і далі через $|x|$ позначатимемо бітову довжину слова x).

Зауважимо, що для побудови монотонного відображення ψ слова коду можна відсортувати за зростанням їхніх довжин, а всередині кожної групи слів однакової довжини — в лексикографічному порядку. Пронумерувавши отриману послідовність кодових слів послідовними натуральними числами, отримаємо шукане відображення. Кодування

згідно з описаним відображенням виконується тривіально і полягає просто у видобуванні кодового слова з масиву за його індексом. Однак наївний спосіб декодування, тобто обчислення $\psi^{-1}(u)$, що полягає в послідовному пошуку кодового слова u в масиві, є неприпустимо довгим. Застосовувати напряму прискорені методи пошуку, такі як двійковий пошук, неможливо, оскільки в цілому масив кодових слів лексикографічно не відсортовано. Отже, найпростіший спосіб декодування потоку конкатенованих кодових слів полягав би в тому, щоб спочатку виявити межі чергового кодового слова й обчислити його довжину, а потім виконати двійковий пошук у лексикографічно відсортованому наборі кодових слів заданої довжини. Проте часова складність такої процедури була б суттєво (в рази) більшою за часову складність прискореного декодування, описаного в [7].

Найкращим варіантом було б віднайти алгоритм обчислення $\psi^{-1}(u)$, тобто декодування слова u , який би обчислював позицію u у впорядкованому за зростанням довжин наборі кодових слів без обчислення довжини u , на основі опрацювання частин слова u зліва направо. Однак це видається проблематичним, оскільки, не знаючи довжини u , ми не знаємо, як впливає на позицію u в наборі кодових слів опрацювання того чи іншого префіксу або підрядка u . Цієї проблеми, можливо, вдалося б уникнути, якби мультироздільникові коди не були б префіксними, тобто деякі префікси довших кодових слів були б коротшими кодовими словами (зауважимо, що префіксність коду є достатньою, але не необхідною умовою його однозначної декодовності). Тоді декодування слова uv , де u — коротке кодове слово, а v — суфікс довшого кодового слова, можна було б виконувати поетапно: спочатку обчислити позицію u у впорядкованому наборі кодових слів довжини не більше ніж $|u|$ (для цього не потрібно знати нічого про v), а потім до цієї позиції додати зміщення uv відносно u у наборі кодових слів довжини не більше ніж $|uv|$.

Зауважимо, що якщо слова мультироздільникового коду записувати справа наліво, то отримаємо якраз непрефіксний, але однозначно декодовний код, який назвемо **реверсним**. Його однозначна декодовність впливає з однозначної декодовності прямого мультироздільникового коду, адже будь-який алгоритм декодування прямого коду є цілком застосовним і до реверсного, якщо опрацюувати закодований файл справа наліво.

Однак найцікавішим є той факт, що у разі опрацювання реверсних мультироздільникових кодів зліва направо можна побудувати просте монотонне кодувальне відображення ψ і зворотне до нього декодувальне відображення ψ^{-1} , яке задовольнятиме всім розглянутим вище вимогам. Такі коди й відображення буде детально досліджено в наступному розділі.

РЕВЕРСНІ МУЛЬТИРОЗДІЛЬНИКОВІ КОДИ

Нехай, як і раніше, $M = \{m_1, \dots, m_l\}$ — зростаюча послідовність цілих чисел, $0 < m_1 < \dots < m_l$.

Означення 2. Реверсним мультироздільниковим кодом R_M називається код, що містить усі слова вигляду 01^α , $\alpha \in M$, і всі слова, які задовольняють таким умовам:

- слово починається з послідовності $01^\alpha 0$, $\alpha \in M$;
- слово не закінчується послідовністю 01^α , $\alpha \in M$;
- слово не містить послідовності $01^\alpha 0$, $\alpha \in M$, ніде, крім початку.

Роздільниками у такому коді є послідовності вигляду $01^\alpha 0$, $\alpha \in M$, однак код містить також слова вигляду 01^α , $\alpha \in M$, які утворюють роздільник разом з першим нулем наступного кодового слова в закодованому тексті.

Спираючись на доведені в [7] властивості однозначної декодовності, повноти та універсальності у розумінні Еліаса [8] прямих мультироздільникових кодів, легко довести відповідні властивості і для реверсних кодів.

Теорема 1. Будь-який реверсний мультироздільниковий код R_M є однозначно декодовним, повним і універсальним.

Доведення. Зауважимо, що будь-яка послідовність слів реверсного коду R_M у разі читання справа наліво збігається з деякою послідовністю слів коду D_M , а отже, код R_M є однозначно декодовним. Також однозначне декодування може бути виконано у разі оброблення закодованого файлу зліва направо за таким принципом:

- зчитуємо файл біт за бітом, поки не зчитуємо послідовності $01^\alpha 0$, $\alpha \in M$;
- поточне кодове слово закінчується перед початком цієї

послідовності, а наступне кодове слово починається з цієї послідовності.

Щоб довести повноту коду R_M , зауважимо, що кількість слів будь-якої заданої довжини L у цьому коді дорівнює кількості слів довжини L у коді D_M . А оскільки, як показано в [7], нерівність Крафта-Макмілана для коду D_M виконується як рівність:

$$\sum_{c \in C} 2^{-|c|} = 1,$$

де C — множина кодових слів, то вона виконуватиметься як рівність і для коду R_M , а отже, цей код є повним.

Щоб довести універсальність коду R_M , розглянемо довільний текст і закодуємо його спочатку кодом D_M , а потім запишемо закодований файл справа наліво, отримавши код R_M .

Застосування цього методу кодування даватиме змогу отримувати для довільного вхідного тексту коду R_M , довжини яких дорівнюватимуть довжинам кодів D_M для цього ж тексту. А оскільки, як доведено в [7], код D_M є універсальним, то і код R_M буде універсальним. ■

Тепер опишемо монотонне відображення множини натуральних чисел на множину слів реверсного мультироздільникового коду R_M , яке також можна назвати принципом формування довших кодів з коротших.

Нехай R_M — реверсний мультироздільниковий код, а $K = \{k_1, \dots, k_q\}$ — впорядкована за зростанням послідовність усіх невід'ємних цілих чисел в діапазоні від 0 до $m_i + 1$ включно, які не належать M . Наприклад, для коду $R_{2,3,5}$ $K = \{0, 1, 4, 6\}$. Насамперед зауважимо, що будь-яке слово коду R_M починається з послідовності 01^α , $\alpha \in M$. Щодо частини слова, яка розташована правіше, можливі 2 варіанти:

- 1) ця частина порожня, тобто все кодове слово має вигляд $01\dots 1$;
- 2) ця частина є конкатенацією груп вигляду $01\dots 1$, кількості одиниць у яких є числами з множини K або цілими числами, що більші за найбільший елемент K .

Отже, будь-яке слово коду R_M довжиною L бітів утворюється одним з таких способів:

- 1) це слово вигляду 01^α , $\alpha \in M$;
- 2) це слово утворюється зі слова довжини $L - k - 1$ бітів дописуванням справа послідовності 01^k , де $k \in K$;
- 3) це слово утворюється зі слова довжини $L - 1$ бітів, що закінчується послідовністю вигляду $01\dots 1$ з не менше ніж $m_i + 1$ одиницями, дописуванням справа одиничного біта.

Достатньо очевидно також, що будь-яке кодове слово може бути утворено лише одним із цих трьох способів. Дійсно, якщо це слово вигляду 01^α , $\alpha \in M$, то воно утворено способом 1, якщо слово закінчується групою бітів вигляду $01\dots 1$ з не більш ніж $m_i + 1$ одиницями, то його можна утворити лише способом 2, а якщо воно закінчується групою бітів вигляду $01\dots 1$ з не менш ніж $m_i + 2$ одиницями, то його можна утворити лише способом 3.

Враховуючи ці факти, сформулюємо принцип побудови впорядкованого набору кодів довжини L , якщо набори слів меншої довжини вже побудовано:

- 1) спочатку запишемо всі кодові слова довжини $L-1$ у тому порядку, як їх було зазначено у наборі слів довжини $L-1$, з доданням справа символу «0», тобто послідовності вигляду $01\dots 1$ з $k_1=0$ одиницями;
- 2) потім запишемо всі кодові слова довжини $L-k_2-1$ у тому порядку, як їх було зазначено у наборі слів довжини $L-k_2-1$, з доданням справа послідовності вигляду $01\dots 1$ з k_2 одиницями тощо;
- 3) коли значення з набору K закінчатся, запишемо всі кодові слова довжини $L-1$, що закінчуються послідовністю вигляду $01\dots 1$ з не менше ніж $m_i + 1$ одиницями, у тому порядку, як їх було зазначено в наборі слів довжини $L-1$, із додаванням справа символу «1»;
- 4) нарешті, якщо значення L на одиницю більше за m_i — значення одного з параметрів коду m_1, \dots, m_t , то додамо до набору слово вигляду $01\dots 1$ з m_i одиницями. Тепер опишемо алгоритм формування послідовності кодів довжини L формально.

Алгоритм 1. Формування послідовності кодів довжини L реверсного мультироздільникового коду R_M .

Вхід: довжина кодового слова L , параметри коду m_1, \dots, m_t .

Результат: Послідовність слів коду R_M довжини L .

1. $i = 1$.
2. Поки $L - k_i > m_i + 1$ і $i \leq |K|$, виконуємо кроки 2а–2б.
- 2а. Додаємо до набору усі коди довжини $L - k_i - 1$, дописуючи до них справа послідовність $01\dots 1$, що містить k_i одиниць. Коди додаються саме у тій послідовності, у якій вони були вказані у наборі кодів довжини $L - k_i - 1$.
- 2б. $i = i + 1$.
3. Якщо існують кодові слова довжини $L-1$, що закінчуються послідовністю вигляду $01\dots 1$ з не менше ніж $m_i + 1$ одиницями, додаємо їх

до набору, дописуючи справа одиничний біт. Коди додаються саме у тій послідовності, у якій вони були вказані у наборі кодів довжини $L - 1$.

4. Якщо $L = m_j + 1$ для деякого j , то додаємо до набору слово $01\dots 1$, що містить m_j одиниць.

Кінець алгоритму.

Увесь набір слів коду R_M формується послідовно: спочатку записуємо найкоротше слово $01\dots 1$ довжини m_1+1 , потім за описаним вище принципом формуємо набір слів довжини m_1+2 і дописуємо їх у кінець послідовності слів тощо. Найважливішою властивістю цього впорядкованого набору кодових слів є те, що їхні бітові довжини утворюють неспадну послідовність.

Для прикладу, на Рис. 1 наведено список слів реверсного мультироздільникового коду $R_{2,3,5}$ довжини не більше ніж 8 і показано, як слова довжини 8 утворюються зі слів довжин 7, 6 та 3 дописуванням справа бітових послідовностей 0, 01 та 01111 відповідно.

Будь-який реверсний мультироздільниковий код є регулярною мовою і тому розпізнається скінченним автоматом, на основі якого можна побудувати декодувальне відображення. Структура такого автомату залежить від параметрів коду. Для прикладу, на Рис. 2 зображено декодувальний автомат для коду $R_{2,3,5}$. Над кожною стрілкою, що символізує перехід з одного стану автомату в інший, перед вертикальною рискою записано символ (0 або 1), у разі зчитування якого відбувається цей перехід, а після риски — операції, які виконуються під час переходу.

$L=3$	$L=4$	$L=5$	$L=6$	$L=7$	$L=8$
011	0110 0111	01100 01110 01101	011000 011100 011010 011001 011101 011111	0110000 0111000 0110100 0110010 0111010 0111110 0110001 0111001 0110101	01100000 01110000 01101000 01100100 01110100 01111100 01100010 01110010 01101010 01100001 01110001 01101001 01100101 01110101 01111101 01101111

Рис. 1. Слова реверсного мультироздільникового коду $R_{2,3,5}$ довжини не більше за 8 символів.

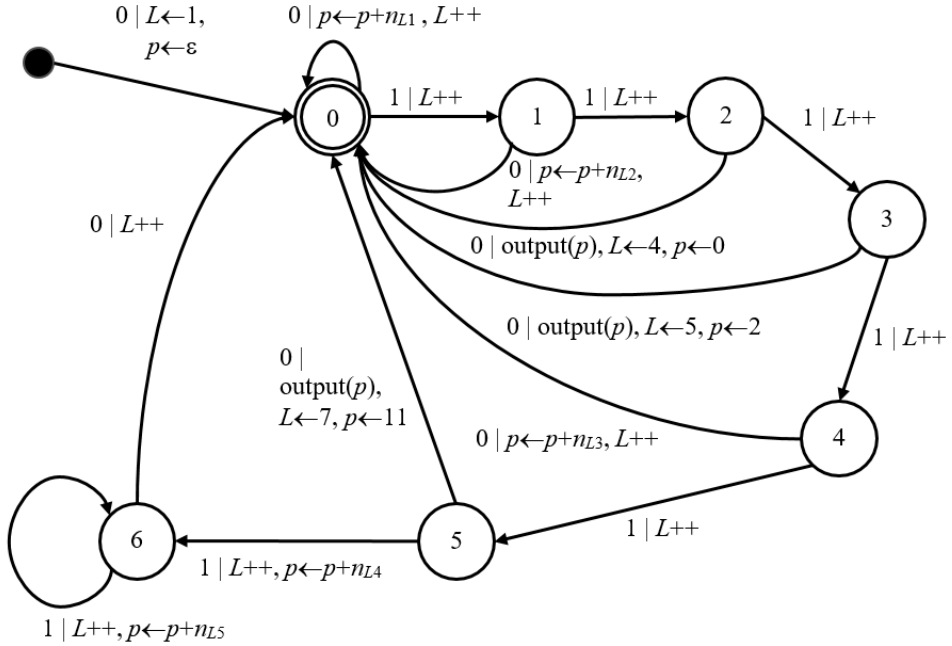


Рис. 2. Декодувальний автомат для коду $R_{2,3,5}$.

Довжину згенерованої частини кодового слова позначено як L . Під час опрацювання кожного біта коду вона збільшується на 1 (цей інкремент позначено як $L++$). А як p позначено величину, що наприкінці опрацювання автоматом кодового слова c дорівнює шуканому числу $\psi^{-1}(c)$. Порядок виконання операцій є важливим, він є саме таким, як зазначено біля стрілок переходів.

Щоб пояснити принцип роботи автомату, зауважимо, що будь-яке слово коду R_M є конкатенацією груп вигляду 01^x , де $x \geq 0$. Після оброблення кожної такої групи та наступного за нею нуля автомат опиняється у стані 0. Групи 011, 0111 та 011111 можуть бути розташовані лише на початку кодового слова. Після їхнього оброблення автомат переходить до стану 0 зі станів 2, 3 або 5 і величина p ініціалізується значеннями 0, 2 та 11, які відповідають положенню слів 011, 0111 та 011111 у послідовності всіх слів коду $R_{2,3,5}$ (Рис. 1), а величина L ініціалізується значеннями 4, 5 або 7 відповідно. Автомат завершує оброблення кодового слова, коли зчитує роздільник на початку наступного кодового слова, і при цьому він також переходить до стану 0 зі станів 2, 3 або 5. Тоді у змінній p міститься отримане в результаті значення $\psi^{-1}(c)$, яке виводиться командою $\text{output}(p)$. Отже, зображений на Рис. 2 автомат опрацьовує потоковий код $R_{2,3,5}$, що є конкатенацією кодових слів. Автомат розпочинає роботу в стані, позначеному чорним кружком, і завершує роботу в стані 0 після зчитування останнього символу файлу з кодом (зауважимо, що наприкінці файлу має бути дописано якийсь роздільник, наприклад 0110). Під час переходу з початкового стану до стану 0

величина p ініціалізується порожнім рядком i , оскільки файл з кодом починається з рядка 0110, 01110 або 0111110, то другий перехід до стану 0 буде виконано зі станів 2, 3 або 5, а отже, жодна команда додання до p значення n_{Lj} до ініціалізації змінної p не виконається.

Під час роботи автомату використовуються допоміжний двовимірний масив, елементи якого позначено як n_{Lj} . Якщо $j \leq |K|$ (для коду $R_{2,3,5}$ $|K| = 4$), то значення n_{Lj} дорівнює величині, на яку збільшується позиція кодового слова у побудованій за алгоритмом 1 послідовності кодових слів у разі дописування до цього слова справа такої групи вигляду $01\dots 1$ з k_j одиницями, що бітова довжина отриманого в результаті слова дорівнюватиме L . Зміст величини $n_{L,|K|+1}$ той самий, тільки до кодового слова дописується справа один символ «1». Так, у разі переходу зі стану 0 до стану 0 до кодового слова довжини $L-1$ справа дописується нульовий біт, що зміщує отримане кодове слово на n_{L1} позицій уперед (оскільки $k_1 = 0$). Перехід зі стану 1 до стану 0 означає дописування до кодового слова справа групи 01 (після якої йде символ «0») і, оскільки $k_2 = 1$, то до величини p додається значення n_{L2} .

Аналогічно, у разі переходу зі стану 4 до стану 0 до кодового слова додається рядок 01111 (після якого йде символ «0»), а до величини p — значення n_{L3} (оскільки $k_3 = 4$). У разі переходу зі стану 5 до стану 6 до кодового слова додається рядок 011111, а до величини p — значення n_{L4} (оскільки $k_3 = 6$). Якщо ж після додавання до кодового слова рядка вигляду $01\dots 1$ із 6 або більше одиницями автомат знову зчитує символ «1», то до величини p додається значення n_{L5} . Зауважимо, що, згідно з алгоритмом 1, зсув усіх кодових слів довжини L у разі додавання до них тієї саме бітової послідовності вигляду $01\dots 1$ буде однаковим, так само, як і зсув усіх слів довжини L не менш ніж із 6 одиничними бітами наприкінці у разі додавання до них одиничного біта.

Реверсні мультироздільникові коди мають такий саме коефіцієнт стискання, як і прямі мультироздільникові коди зі словником достатньо великого розміру, тобто словником у вигляді масиву, що містить слова вихідного тексту в таких позиціях i_1, \dots, i_n , що образи $\psi(i_1), \dots, \psi(i_n)$ є n найкоротшими кодовими словами, де n — кількість різних слів у тексті. Однак, як зазначено вище, словник за такого підходу збільшується експоненційно відносно n і тому навіть для текстів середнього розміру, таких як Біблія, використання такого словника є практично неможливим.

Для порівняння практичної стискальної ефективності прямих та реверсних мультироздільникових кодів було проведено обчислювальний експеримент, результати якого наведено в табл. 1.

Коди було апробовано на трьох текстах: відносно невеликому українському, а також на англійських текстах середнього та великого розміру. Середній текст — це англійський переклад Біблії, а великий текст, який ми позначатимемо EN, — вибірка випадкових статей з Вікіпедії. З текстів було видалено знаки пунктуації, а також скасовано розрізнення великих і малих літер. Символами вхідного алфавіту вважалися слова, тобто послідовності літер між двома пробілами.

Табл. 1. Порівняння стискальної ефективності мультироздільникових та реверсних мультироздільникових кодів (наведено середню довжину кодового слова в бітах і відсоток перевищення значення ентропії)

Текст	Кількість слів у тексті	Розмір словника	Значення ентропії	$D_{2,3,5}$	$D_{2,3,5}^L$	$R_{2,3,5}$	$R_{2-\infty}$	$R_{2,4-\infty}$
Хіба ревуть воли як ясла повні, П. Мирний (українською)	104 832	22 512	11,519	12,476 8,3%	12,826 11,3%	12,305 6,8%	12,418 7,8%	12,192 5,8%
Біблія (англійською)	790 018	14 018	8,879	9,236 4%	9,315 4,9%	9,211 3,7%	9,082 2,3%	9,2 3,6%
EN — статті з Вікіпедії (англійською)	19 507 783	288 179	11,0783	11,488 3,7%	11,544 4,2%	11,464 3,5%	11,6 4,7%	11,393 2,8%

У стовпцях табл. 1, що відповідають кодам, наведено середні довжини слів у бітах, а також перевищення цими значеннями інформаційної ентропії — теоретичної нижньої межі для такої величини, як середня довжина кодового слова у разі застосування частотного методу кодування. Поряд з реверсним кодом $R_{2,3,5}$ використано прямий мультироздільниковий код з незбільшеним словником (тобто до складу цього коду включено слова, які є образами перших n натуральних чисел) — $D_{2,3,5}^L$ — та код $D_{2,3,5}$, словник якого збільшено у 4 рази порівняно з мінімальним. Як свідчать наведені в табл. 1 результати, реверсний мультироздільниковий код забезпечує коефіцієнт стиснення тексту на 0,2–0,3 % вищий, ніж відповідний прямий мультироздільниковий код з у 4 рази більшим словником, та на 0,7–1,2 % вищий, ніж прямий мультироздільниковий з незбільшеним словником. Враховуючи, що загалом перевищення ентропійної межі для цих кодів становить 3,5–5 %, отримуємо для реверсних мультироздільникових кодів на 20–30 % краще наближення до ентропійної межі, ніж для прямих мультироздільникових кодів з незбільшеним словником, що є достатньо суттєвою перевагою.

Підвищити ступінь стиснення можна ще більше завдяки використанню кодів з більш ніж трьома роздільниками. Підбір оптимального набору роздільників реверсного коду для певного тексту легко автоматизувати, що й було зроблено для двох текстів з табл. 1. Для Біблії це виявився код з усіма роздільниками, що містять від 2 або більше одиниць; у табл. 1 його позначено як $R_{2-\infty}$, а для статей з Вікіпедії — код, що має роздільник з двома одиницями, а також усі роздільники, що містять не менше 4 одиниць; у табл. 1 його позначено як $R_{2,4-\infty}$.

Зауважимо, що насправді у проведеному обчислювальному експерименті найдовший роздільник у кодах $R_{2-\infty}$ та $R_{2,4-\infty}$ містив 15 одиниць, а додавання наступних роздільників підвищувало ступінь стиснення незначно. Так, коди R_{2-16} порівняно з R_{2-15} для Біблії та $R_{2,4-16}$ порівняно з $R_{2,4-15}$ для статей з Вікіпедії були коротшими менш ніж на 0,01 %. Тому можна вважати, що $R_{2-15} \approx R_{2-\infty}$ та $R_{2,4-15} \approx R_{2,4-\infty}$.

ОПТИМІЗАЦІЯ ОБРОБЛЕННЯ СЛОВНИКА

У попередніх розділах ми досліджували теоретичні властивості кодів та порівнювали їхній потенціал у стисканні природномовних текстів. Для цього було достатньо знати, який обсяг мав той чи інший закодований текст. Однак на практиці, якщо елементами вхідного алфавіту є слова природної мови, то крім власне закодованого тексту, у файлі архіву потрібно зберігати ще й словник *Dict* — це необхідна умова для побудови на основі коду архівувальної програми. Словник збільшує обсяг закодованого файлу і тому його теж потрібно зберігати в більш чи менш компактній формі. Зауважимо, що для мультироздільникових кодів зберігати словник у вигляді послідовності пар (слово вхідного тексту, кодове слово) недоцільно. Адже достатньо зберегти лише послідовність слів вхідного тексту, впорядкованих у порядку спадання їхніх частот. Тоді декодування виглядатиме так:

1) знаходимо для чергового кодового слова *code* натуральне число, що є його прообразом $\psi^{-1}(code)$;

2) додаємо до декодованого тексту елемент словника $Dict[\psi^{-1}(code)]$.

Опишемо деякі прості прийоми, що дають змогу досягти певного покращення коефіцієнту стискання текстів, як без, так і із застосуванням архіватора, якщо разом із текстом зберігається словник. Легко зауважити надлишковість у кодуванні слів, що трапляються в тексті один раз: у закодованому файлі вони трапляються і в словнику, і у вигляді кодового слова в самому тексті. Можна було б уникнути подання таких слів у вигляді кодового слова взагалі, записуючи їх у тексті в незакодованому вигляді. Однак тоді постає завдання виявлення початків та кінців таких слів, що вимагає використання додаткових спеціальних символів. Тому ефективнішим видається описаний нижче підхід до подолання цієї проблеми.

1. Відсортувати фрагмент словника, що містить слова із частотою 1, у порядку появи цих слів у тексті. Позначимо цей відсортований фрагмент як $Dict_1$.

2. Кодувати слова, що мають частоту 1, не кодами їхніх номерів у словнику, а певним спеціальним коротким кодовим словом $code_1$ (однаковим для всіх таких слів).

3. Під час декодування, коли трапляється кодове слово $code_1$, замінювати його черговим словом з фрагменту словника $Dict_1$.

Спосіб вибору кодового слова $code_1$ є достатньо очевидним. У щойно описаному методі під час кодування та декодування всі слова із частотою 1 розглядаються як одне те саме слово, яке має певну (достатньо високу) частоту. А отже, у впорядкованому за спаданням частот списку слів тексту це слово має певний номер, якому і відповідає кодове слово $code_1$.

У результаті для запису кожного слова $word$ із частотою 1 замість $|word| + |\psi(word)|$ бітів використовується $|word| + |code_1|$ бітів. Економія відбувається завдяки тому, що $|code_1| < |\psi(word)|$. Так, наприклад, у тексті EN слово $word_1$ має 15-ту позицію за частотою, якщо рахувати від найбільшої, а $|code_1|=7$, тоді як середнє значення $|\psi(word)|$, $word \in Dict_1$, становить 25,68.

Звичайно, потрібно також зберігати позицію першого слова у фрагменті словника $Dict_1$. Під це число можна відвести фіксовану кількість бітів на початку файлу архіву або закодувати його одним з універсальних кодів.

Для прикладу розглянемо принцип кодування фрази «Мій великий стіл – це мій стіл». Для спрощення переведемо всі слова у нижній регістр: «мій великий стіл це мій стіл». Множиною унікальних слів разом з їхніми частотами є [мій → 2; великий → 1; стіл → 2; це → 1]. Будуємо відображення з множини унікальних слів у множину натуральних чисел таким чином, щоб словам з більшою частотою відповідали менші числа. Побудоване відображення буде мати вигляд [мій → 1; стіл → 2; великий → 3; це → 4]. Словником у цьому випадку буде [мій стіл великий це]. Далі можемо записати закодовану послідовність: [мій стіл великий це][1 3 2 4 1 2]. Для спрощення прикладу натуральні числа не замінювалися кодовими словами. У реальних експериментах така заміна здійснюється, а також між кодовими словами не записують пробілів. Як видно, слова «великий» та «це» трапляються у закодованій послідовності двічі. Кількість слів із частотою 1 дорівнює 2. Нам потрібно модифікувати відображення з множини унікальних слів на множину натуральних чисел, видаливши всі слова частоти 1 та додавши одне нове слово, частотою якого буде кількість видалених слів. Модифіковане відображення буде мати вигляд [$word_1$ → 1; мій → 2; стіл → 3]. У результаті кодування буде мати вигляд [2][мій стіл великий це][2 1 3 1 2 3]. Префікс [2] дає інформацію про кількість слів із частотою 1.

Описаний спосіб оптимізації словника можна також поширити на слова із частотою більше ніж 1. Нехай $Dict_k$ — це фрагмент словника, що містить слова із частотою k , впорядковані за місцем першої появи в тексті. Під час кодування тексту, у разі якщо слово $word \in Dict_k$ трапляється вперше, кодуємо його спеціальним словом $code_k$, а якщо не вперше — то кодовим словом, яке відповідає номеру слова $word$ у загальному словнику. Під час декодування, коли трапляється кодове слово $code_k$, замінюємо його черговим словом з фрагменту словника $Dict_k$.

Так, у попередньому прикладі було два слова із частотою 2: «мій» та «стіл». Якщо замінювати також слова із частотою 2, то модифіковане відображення словника на натуральні числа матиме вигляд [$word_2$ → 1; $word_1$ → 2; мій → 3; стіл → 4]. У результаті кодування буде мати вигляд [2 2][мій стіл великий це][1 2 1 2 3 4]. У префіксі [2 2] записана кількість слів із частотою 2 та із частотою 1.

Звичайно, чим більшим буде значення k , тим менший ефект даватиме такий прийом, оскільки, по-перше, у природномовному тексті кількість різних слів із частотою k зі збільшенням k зменшується (а з k екземплярів кожного такого слова скорочуватиметься код лише одного); по-друге, чим більшою є частота k слова $word$, тим коротшим є його оригінальний код $\psi(word)$ і, нарешті, використання деяких кодових слів як зарезервованих дещо збільшує довжину інших кодових слів. На випробуваних природномовних текстах для $k \geq 3$ застосування описаного методу не дає практично ніякого покращення коефіцієнту стискування.

ПОКРАЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІДОМИХ АРХІВАТОРІВ

Аналіз ефективності стискання, крім вищезазначеного тексту англійською мовою (EN), було проведено на текстах німецькою (GE), російською (RU) та українською (UA) мовами. Файл EN, як уже згадувалося, є вибіркою статей з Вікіпедії. Файли іншими природними мовами було створено за допомогою автоматичної системи збирання новин з Інтернету. Для текстів застосовували передоброблення у вигляді вилучення всіх розділових знаків з тексту та запису слів великими літерами через один пробіл. Елементами алфавіту були послідовності символів між двома пробілами. Характеристики всіх отриманих файлів наведено в таблиці 2.

Надалі будемо використовувати наступні позначення: Enc — застосування кодування до файлу, Dict — додання словника, Collapsed_1 — оптимізація словника для слів із частотою 1, Collapsed_1_2 оптимізація словника для слів із частотами 1 та 2, Ar — застосування архіватора. Порівняння також проводилося з такими потужними ентропійними кодуваннями, як коди Гаффмана (Huff) [4] та ентропійне кодування зі скінченними станами (FSE, Finite State Entropy) на основі асиметричних систем числення [14].

Різні архіватори дають різні результати стиснення. Тому важливим є порівняння їхніх характеристик. У контексті цієї роботи використовувалися архіватори 7z, zstd, bzip2 та gzip. У таблиці 3 наведено результати архівування файлу EN. Як видно, найкращі показники має архіватор 7z, причому його перевага була стабільною в усіх проведених експериментах. Тому в подальшому наведено результати саме для цього архіватора.

У таблиці 4 наведено результати кодування англійського тексту за допомогою кодування $R_{2,4-\infty}$, $R_{2-\infty}$, FSE та Гаффмана, із застосуванням оптимізації словника та комбінуванням з архіватором 7z. Зауважимо, що застосування оптимізації словника завжди покращує кінцеві результати стискання, незалежно від того, який саме реверсний мультироздільниковий код застосовувався, а також від того, застосовувався потім архіватор чи ні. Крім того, оптимізація за словами із частотами 1 і 2 (Collapsed_1_2) завжди дає більший ефект, ніж лише за словами із частотою 1 (Collapsed_1). У найкращому випадку вдається досягти показника, що на 0,58 % перевищує значення ентропії. Зауважимо, що цей результат є найкращим серед усіх досліджених методів стиснення для файлу EN в рамках цієї роботи. Покращення відносно застосування одного лише архіватора 7z складає 3.02 %.

Табл 2. Характеристики вихідних текстів

Файл	Кількість слів	З них унікальних слів	Розмір, Мб	Ентропія, Мб	Словник, Мб
EN	19507783	288179	116,92	27,01	2,59
GE	22040994	432386	150,5	32,48	5,47
RU	9934417	298343	132,46	16,09	5,62
UK	9859970	291218	126,85	15,87	5,36

Табл 3. Результати стиснення англійського тексту архіватором 7z

Файл	Архіватор	Розмір, Мб	% перевищення ентропії
EN	7z	27,98	3,6 %
EN	Zstd	28,15	4,2 %
EN	Bzip	31,66	17,2 %
EN	Gzip	37,35	38,3 %

Табл. 4. Результати стиснення англійського тексту за допомогою реверсних мультироздільникових кодів, кодів Гаффмана та кодування FSE із та без подальшого архівування архіватором 7z

Файл	Enc	Метод	Арх.	Розмір, Мб	% перевищення ентропії
EN	$R_{2,4-\infty}$	Enc		30,37	12,4 %
EN	$R_{2,4-\infty}$	Collapsed_1 Enc		30,11	11,47 %
EN	$R_{2,4-\infty}$	Collapsed_1_2 Enc		30,05	11,22 %
EN	$R_{2,4-\infty}$	Enc	7z	27,52	1,88 %
EN	$R_{2,4-\infty}$	Collapsed_1 Enc	7z	27,34	1,21 %
EN	$R_{2,4-\infty}$	Collapsed_1_2 Enc	7z	27,29	1,01 %
EN	$R_{2-\infty}$	Enc		30,87	14,3 %
EN	$R_{2-\infty}$	Collapsed_1 Enc		30,58	13,21 %
EN	$R_{2-\infty}$	Collapsed_1_2 Enc		30,50	12,9 %
EN	$R_{2-\infty}$	Enc	7z	27,64	2,32 %
EN	$R_{2-\infty}$	Collapsed_1 Enc	7z	27,23	0,80 %
EN	$R_{2-\infty}$	Collapsed_1_2 Enc	7z	27,17	0,58 %
EN	FSE	Enc		29,91	10,7 %
EN	FSE	Enc	7z	28,30	4,77 %
EN	Huff	Enc		29,97	10,95 %
EN	Huff	Enc	7z	28,00	3,64 %

Природним є питання про те, чи буде розроблений метод давати покращення для інших мов, крім англійської. У таблиці 5 наведено результати стиснення текстів німецькою, російською та українською мовами. Для файлу GE покращення становить 2,99 %. Для російського та українського текстів запропонований нами метод покращення не дає. Мабуть, це пояснюється високофлексивним характером слов'янських мов, що приводить до значно більшої кількості різних слів відносно обсягу тексту.

Також варто зауважити, що в наведених результатах розмір стиснених даних буває меншим за рівень ентропії. Це пояснюється тим, що під час визначення ентропії елементами вихідного алфавіту послідовності символів між двома пробілами, а насправді текст можна поділяти на слова багатьма способами, що і практикується в універсальних архіваторах. Інакше кажучи, значення ентропії, обчислене за «традиційного» поділу тексту на слова не є мінімально можливим, якщо порівнювати з іншими способами обчислення цієї величини.

Табл. 5. Результати стиснення файлів GE, RU та UK окремо архіватором 7z та у комбінації з розробленими методами передоброби.

Файл	Enc	Метод	Ar	Розмір, Мб	% перевищення ентропії
GE			7z	32,78	0,96 %
GE	FSE	Enc	7z	33,96	4,56 %
GE	Huff	Enc	7z	32,85	1,14 %
GE	$R_{2,4-\infty}$	Collapsed_1_2 Enc	7z	31,97	-1,57 %
GE	$R_{2-\infty}$	Collapsed_1_2 Enc	7z	31,82	-2,04 %
RU			7z	14,77	-8,17 %
RU	FSE	Enc	7z	17,52	8,89 %
RU	Huff	Enc	7z	16,29	1,24 %
RU	$R_{2,4-\infty}$	Collapsed_1_2 Enc	7z	15,84	-1,55 %
RU	$R_{2-\infty}$	Collapsed_1_2 Enc	7z	15,74	-2,20 %
UK			7z	15,33	-3,41 %
UK	FSE	Enc	7z	17,31	9,05 %
UK	Huff	Enc	7z	16,55	4,28 %
UK	$R_{2,4-\infty}$	Collapsed_1_2 Enc	7z	16,14	1,65 %
UK	$R_{2-\infty}$	Collapsed_1_2 Enc	7z	16,05	1,15 %

Загалом можливість покращення коефіцієнту стиснення архіваторів завдяки мультироздільниковим кодам можна пояснити тим, що ці коди не тільки стискають текст, але і вносять в нього певну регулярність, яка потім використовується архіваторами.

ВИСНОВКИ

У статті було досліджено новий клас кодів із роздільниками — реверсні мультироздільникові коди, які є вдосконаленою версією нещодавно винайдених «прямих» мультироздільникових кодів. Реверсні коди вирішують проблему немонотонності словника, властиву прямим мультироздільниковим кодам, зберігаючи всі їхні позитивні властивості, такі як швидкість декодування, стійкість до помилок та можливість пошуку інформації в закодованому тексті без його розкодування.

Також було досліджено можливість підвищення ефективності архівування природномовних текстів завдяки їх попередньому кодуванню реверсними кодами. Зазначимо, що в сучасних архіваторах застосовуються найрізноманітніші методи стиснення даних і можливість покращення коефіцієнту стиснення, що досягається цими програмами, видається вельми проблематичною. Однак завдяки використанню реверсних мультироздільникових кодів та описаних у статті способів оптимізації словника у цьому напрямі вдалося досягти позитивних результатів для текстів нефлективними мовами (англійською та німецькою), покращивши коефіцієнт стиснення текстів на 1–3% при тому, що використовувався найкращий із відомих архіваторів в режимі максимального стиснення.

ЛІТЕРАТУРА

1. D. Salomon. Variable-Length Codes for Data Compression. London. U.K.: Springer-Verlag, 2007.
2. Burrows M., Wheeler D. J. A Block-Sorting Lossless Data Compression Algorithm. Digital Systems Research Center, Palo Alto, CA, USA. 1994, Research Report 124.
3. Б. Я. Рябко, “Сжатие данных с помощью стопки книг”, Проблемы передачи информации, т. 16, вып. 2. с. 16-21, 1980.
4. Huffman D. A method for the construction of minimum redundancy codes. *Proc. IRE.* 1952, Vol. 40, pp. 1098–1101.
5. Lakshmanan K.B. On universal codeword sets. *IEEE Transactions on Information Theory.* 1981, Vol. 27, pp. 659–662.
6. Apostolico A., Fraenkel A. Robust transmission of unbounded strings using Fibonacci representations. *IEEE Transactions on Information Theory.* 1987, Vol. IT-33, no. 2, pp. 238–245.
7. Anisimov A.V., Zavadskiy I.O. Variable-Length Prefix Codes With Multiple Delimiters. *IEEE Transactions on Information Theory.* 2017, vol. 63, no. 5, pp. 2885–2895.
8. Elias P. Universal codeword sets and representation of the integers. *IEEE Transactions on Information Theory.* 1975, Vol. 21, no. 2, pp. 194–203.
9. Golomb S.W. Run-length encodings. *IEEE Transactions on Information Theory.* 1966, Vol. IT-12, no. 3, pp. 399–401.
10. Klein S.T., Ben-Nissan M.K. On the usefulness of Fibonacci compression codes. *Computer Journal.* 2010, Vol. 53, no. 6, pp. 701–716.
11. Ziv J., Lempel A. A Universal Algorithm for Sequential Data Compression. *IEEE Transactions on Information Theory.* 1977, Vol. 23, no. 3, pp. 337–343.
12. Welch T. A Technique for High-Performance Data Compression. *IEEE Computer.* 1984, Vol. 17, no. 6, pp. 8–19.
13. Witten I.H., Neal R.M., Cleary J.G. Arithmetic Coding for Data Compression. *Communications of the ACM.* 1987, Vol. 30, no. 6, pp. 520–540.
14. Duda J., Tahboub K., Gadgil N. J., Delp E. J. The use of asymmetric numeral systems as an accurate replacement for Huffman coding. 2015 Picture Coding Symposium (Cairns, QLD, Australia, 31st of May—3rd of Jun, 2015). Cairns, Australia, pp. 65–69.
15. Anisimov A.V., Zavadskiy I.O. Splittable Data Compression Codes. 2019 IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory (Kyiv, Ukraine, 18–20th of Dec, 2019). Kyiv, Ukraine, pp. 71–74.
16. Завадський І.О. Подільні коди та їх застосування. Рукопис дисертації на здобуття наукового ступеня доктора фіз.-мат. наук. Київ, 2020, 335 с.
17. Zavadskiy I.O., Anisimov A.V. A Family of Data Compression Codes with Multiple Delimiters. Prague Stringology Conference (Prague, Czech Republic, 29–31th of Aug, 2016). Prague, Czech Republic, 2016, pp. 71–84.

Отримано 10.09.2020

REFERENCES

1. D. Salomon. Variable-Length Codes for Data Compression. London. U.K.: Springer-Verlag, 2007.
2. Burrows M., Wheeler D. J. A Block-Sorting Lossless Data Compression Algorithm. Digital Systems Research Center, Palo Alto, CA, USA. 1994, Research Report 124.
3. B. Ya. Ryabko, Data compression using the book stack transformation. Information transmission problems. 1980, Vol. 16, no. 2, pp. 16-21. (in Russian).
4. Huffman D. A method for the construction of minimum redundancy codes. *Proc. IRE.* 1952, Vol. 40, pp. 1098–1101.
5. Lakshmanan K.B. On universal codeword sets. *IEEE Transactions on Information Theory.* 1981, Vol. 27, pp. 659–662.
6. Apostolico A., Fraenkel A. Robust transmission of unbounded strings using Fibonacci representations. *IEEE Transactions on Information Theory.* 1987, Vol. IT-33, no. 2, pp. 238–245.

7. Anisimov A.V., Zavadskiy I.O. Variable-Length Prefix Codes With Multiple Delimiters. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2017, vol. 63, no. 5, pp. 2885–2895.
8. Elias P. Universal codeword sets and representation of the integers. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1975, Vol. 21, no. 2, pp. 194–203.
9. Golomb S.W. Run-length encodings. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1966, Vol. IT-12, no. 3, pp. 399–401.
10. Klein S.T., Ben-Nissan M.K. On the usefulness of Fibonacci compression codes. *Computer Journal*. 2010, Vol. 53, no. 6, pp. 701–716.
11. Ziv J., Lempel A. A Universal Algorithm for Sequential Data Compression. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1977, Vol. 23, no. 3, pp. 337–343.
12. Welch T. A Technique for High-Performance Data Compression. *IEEE Computer*. 1984, Vol. 17, no. 6, pp. 8–19.
13. Witten I.H., Neal R.M., Cleary J.G. Arithmetic Coding for Data Compression. *Communications of the ACM*. 1987, Vol. 30, no. 6, pp. 520–540.
14. Duda J., Tahboub K., Gadgil N. J., Delp E. J. The use of asymmetric numeral systems as an accurate replacement for Huffman coding. 2015 Picture Coding Symposium (Cairns, QLD, Australia, 31st of May—3rd of Jun, 2015). Cairns, Australia, pp. 65–69.
15. Anisimov A.V., Zavadskiy I.O. Splittable Data Compression Codes. 2019 IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory (Kyiv, Ukraine, 18–20th of Dec, 2019). Kyiv, Ukraine, pp. 71–74.
16. Zavadskiy I.O. Splittable codes and their applications. Doctor of science thesis. Kyiv, 2020, 335 P. (in Ukrainian)
17. Zavadskiy I.O., Anisimov A.V. A Family of Data Compression Codes with Multiple Delimiters. Prague Stringology Conference (Prague, Czech Republic, 29–31st of Aug, 2016). Prague, Czech Republic, 2016, pp. 71–84.

Received 10.09.2020

Anisimov A.V., DSc (Phys & Math), corresponding member
of National Academy of Sciences of Ukraine,

Dean of the Faculty of Computer Science and Cybernetics
e-mail: anatoly.v.anisimov@gmail.com

Zavadskiy I.O., DSc (Phys & Math),
associate professor of the Mathematical Informatics Department
e-mail: ihorza@gmail.com

Chudakov T.S., student
e-mail: timofey.chudakov@gmail.com

Faculty of Computer Science and Cybernetics
of Taras Shevchenko National University of Kyiv ,
4d, Glushkov av., 03022, Kyiv, Ukraine

APPLICATION OF MULTI-DELIMITER CODES TO NATURAL LANGUAGE TEXT ARCHIVING

Introduction. *The efficiency of modern archivers is approaching to the theoretical limit. Even small compression ratio improvements for some specific data types, by less than 1%, is assumed to be essential when the reasonable time complexity is maintained. This research is actual since a new data encoding method is developed, which gives the possibility to achieve rather more significant improvement of the compression ratio when it comes to English or German texts archiving.*

The purpose of the paper is to solve the problem of non-monotonicity of a multi-delimiter code dictionary and investigate the possibility of use the multi-delimiter encoding on the preprocessing stage of natural language texts archiving.

Results. *The concept of the reverse multi-delimiter code is introduced. The monotonic encoding as well as the decoding mapping from the set of natural numbers to the set of reverse multi-delimiter code codewords is built. The efficiency of applying the reverse multi-delimiter codes to natural language text compression is investigated together with the method of dictionary optimization. The provided experiments show that the reverse multi-delimiter encoding of English and German texts on the preprocessing stage and applying the proposed dictionary optimization method allows us to improve the marginal compression efficiency of the most powerful archivers in the maximal compression mode by about 1–3%.*

Conclusions. *The reverse multi-delimiter codes can be considered as an efficient tool when it comes to compression of natural language texts. As a standalone solution, these codes are robust, provide the possibility to fast decode and search the data in a compressed file. As a tool for natural language text preprocessing for subsequent archiving, the reverse multi-delimiter codes together with the method of dictionary optimization allow us to improve the compression rate of the best up-to-date known archivers.*

Keywords: *compression, archiving, archiver, compression code, multi-delimiter code, reverse multi-delimiter code, dictionary optimization, natural language text.*

DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt202.04.025>

UDC 004.67: 543.062

SUROVTSEV I.V.¹, DSc (Engineering), Senior Researcher,
Head of the Ecological Digital Systems Department
e-mail: dep175@irtc.org.ua, igorsur52@gmail.com

VELYKYI P.Yu.¹, PhD Student
Ecological Digital Systems Department
e-mail: velykyi305@gmail.com

GALIMOVA V.M.², PhD (Chemistry), Associate Professor,
Senior Lecturer,
the Department of Analytical and Inorganic
Chemistry and Water Quality
e-mail: galimova2201@gmail.com

SARKISOVA M.V.² Student,
Veterinary Faculty
e-mail: mari.doga2014@gmail.com

¹ International Research and Training Center
of Information Technologies
and Systems of NAS of Ukraine and MES of Ukraine,
40, Acad. Glushkov av., Kyiv, 03187, Ukraine

² National University of Life
and Environmental Sciences of Ukraine,
17, bldg. 2, Heroes of Defense str.,
03041, Kyiv, Ukraine

IONOMETRIC METHOD FOR DETERMINATION OF CONCENTRATIONS OF MICROELEMENTS IN RESEARCH OF DIGITAL MEDICINE

Introduction. *The use of ionometric methods of chemical analysis allows to quickly determine the safety of drinking water and the concentration of electrolytes of body fluids in research in digital medicine.*

The purpose of the paper is to develop an algorithm for processing data measuring alkali and alkaline earth metal concentrations by a new electrochemical method of chronoionometry, based on the use of the principles of direct potentiometry and ion-selective electrodes on the inversion chronopotentiometry device.

Methods. *According to the algorithm, the potentials are read in time at a speed of 4 KHz, a constant potential value is determined and a chronopotentiogram is plotted to control stability. According to the linear dependence of the potential difference on the logarithm of the mass of the additives, the mass of the element is found in the sample solution and the values of the element concentrations are determined by the electrode characteristic.*

© SUROVTSEV I.V., VELYKYI P.Yu., GALIMOVA V.M., SARKISOVA M.V., 2020

ISSN 2663-2586 (Online), ISSN 2663-2578 (Print). Cyb. and comp. eng. 2020. № 4 (202)

Results. The method of chronoionometry was developed and testing was performed on the device of stripping chronopotentiometry "Analyzer SCP" for determining the concentrations of potassium, sodium and calcium in model aqueous solutions. Analytical system "Analyzer SCP" includes five electrochemical research methods: the method of stripping chronopotentiometry (SCP); pulse method SCP (PSCP); differential pulse method SCP (DPSCP); oxidative pulse method SCP (OPSCP); chronoionometric method (CHI). The algorithm for processing concentration measurement data by chronoionometry makes it possible to select specific potential measurements and not take into account unstable values. Measurements are performed by the method of multiple standard additives to ensure controllability of the analysis results.

Conclusions. The proposed method of chronoionometry improves the clarity and control of the stability of potential measurements, allows to choose specific values of additives when calculating concentrations, which increase the reliability and accuracy of measuring concentrations of chemical elements, expands the functionality of the device for stripping chronopotentiometry and makes it more versatile.

Keywords: ionometry method, concentration, ion-selective electrodes, stripping chronopotentiometry, drinking water quality, digital medicine.

INTRODUCTION

One of the priorities of the development and implementation of intelligent information technologies in digital medicine is to improve methods for determining the quality of the human environment for the prevention of the most common diseases.

Most common human diseases are caused by the consumption of poor-quality drinking water and food, as well as the unsatisfactory state of the environment, which necessitates periodic monitoring of these biogeochemical facilities. Of particular importance for the prevention of human diseases is the determination of drinking water quality by measuring low and trace amounts of toxic and man-made chemical elements to establish compliance with physico-chemical and sanitary-toxicological indicators of drinking water safety. Methods of diagnosis include determination of electrolyte concentrations of body fluids, which can be performed by ionometric methods of chemical analysis using ion-selective electrodes.

To perform quality control of the ecological state of the environment, for example, water supply sources [1–3], the International Research and Training Center for Information Technologies and Systems of NAS of Ukraine and MES of Ukraine developed a highly sensitive analytical system "Analyzer SCP" [4], which is based on electrochemical methods of stripping chronopotentiometry SCP. The analytical system allows to determine the trace concentrations of 14 toxic elements in drinking water and in various environmental objects [5–8].

The physical component of SCP chemical methods is the measurement in time of the values of the potential of the indicator and auxiliary electrode in the sample solution, which is a necessary condition for the use of direct potentiometry (ionometry) to determine the concentrations of trace elements. To expand the functionality of the analytical system "Analyzer SCP" added chronoionometric method (CHI) for measuring the concentrations of ions of chemical elements and compounds using ion-selective electrodes (ISE).

PROBLEM STATEMENT

The choice of chemical elements for practical implementation by chronoionometry was determined by the importance of determining the ion concentrations of the element for patient diagnosis by electrolyte analysis, as well as the need to control it in determining the quality of drinking water in accordance with sanitary and toxicological standards.

Based on this, the functions performed in the human body are analyzed, the following common chemical elements: **sodium, potassium, calcium**.

Potassium is the main cation of intracellular fluid, which performs the functions of regulation of neuromuscular excitability, regulation of heart rate, regulation of intracellular and extracellular volume and acid-base status.

The reference range of the concentration of potassium ions (K^+) in serum and blood plasma is (3–12 mmol/dm³). Maintenance of K^+ levels in the human body depends on the normal functioning of the kidneys, gastrointestinal tract, aldosterone excretion in the adrenal glands, the normal acid-base state and the activity of Na^+ / K^+ ions [9].

Violation of any of these mechanisms can alter K^+ levels, so a decrease in blood concentration less than 3.5 mmol/dm³ causes hypokalemia (peripheral paralysis, respiratory failure, cardiac arrhythmia or cardiac arrest) and an increase above 5.0 mmol/dm³ causes hyperkalemia (renal dysfunction, renal failure) [10].

Sodium is the main cation, which makes a significant contribution to the osmolarity of extracellular fluid, and its main function is to regulate water balance and maintain blood pressure [11]. In addition, Na^+ ions play an important role in conducting nerve impulses and activating muscle contraction.

The reference range of concentration of potassium ions (Na^+) is (116–166 mmol/dm³). About a third of Na^+ is in the human body in the form of complexes in the bones; almost all other sodium is dissolved in the extracellular fluid. As a major component of extracellular fluid, Na^+ plays a significant role in maintaining blood volume and blood pressure. If the concentration of sodium in the extracellular fluid is too low and is less than 135 mmol/dm³, then hyponatremia occurs when water moves into the cells, causing them to swell. This is especially dangerous for brain cells, as their expansion increases intracranial pressure, causing brain edema. Causes of hyponatremia can be heart and kidney failure, cirrhosis, Addison's disease, and causes of hypernatremia (sodium concentration greater than 150 mmol/dm³) — chronic renal failure, Conn's syndrome, Cushing's disease, diabetes mellitus. Measurement of Na^+ concentration is especially important for the calculation of the anionic gap, the most important diagnostic parameter in acid-base disorders. Disorders of sodium and water metabolism — dysnatremia is observed in a number of acute and chronic diseases, such as cystic fibrosis, which causes inflammation in the bronchi and leads to hypoxia and pulmonary heart disease [12].

Calcium is one of the most common cations in the body, which plays a key role in bone mineralization and many cellular processes, such as heart and skeletal muscle contraction, neuromuscular transmission, hormone secretion, enzymatic processes such as blood clotting.

The reference range of calcium ion concentrations (Ca^{2+}) is (1.15–1.33 mmol/dm³). Almost all (99%) of the approximately 1 kg of calcium in the human body is contained in bones and teeth, the other calcium is distributed between the intracellular fluid of all cells and the extracellular fluid.

Maintaining Ca^{2+} concentrations in the normal range is important not only for the structural integrity of bones, but also for a number of other physiological functions, including: hemostasis (calcium is a major factor in blood clotting), heart and skeletal muscle contraction, neuromuscular transmission, calcium signaling hormones.

Both increase and decrease in the level of Ca^{2+} are manifested clinically and in severe cases can be fatal. Even a mild disorder, if not detected and corrected, negatively affects the long-term prognosis of the human condition [13].

Ion-selective electrodes for measuring potassium, sodium and calcium.

A large number of different types of ISE have been developed for the determination of potassium, sodium, and calcium ions in biological body fluids, ecological objects of the environment and technological production processes. When using ISE, the main directions of research are aimed at increasing the selectivity of individual ions [14, 15], the use of polymer composites [16, 17], carbon nanotubes and nanomaterials [18, 19], nanowire transistor sensors [20], flexible ion sensors based on polyelectrolyte layers assembled on carbon adhesive tape [21], highly stretchable potentiometric ion sensor based on surface strain redistributed fiber for sweat monitoring [22], wearable potentiometric sensors based on commercial carbon fibres [23]. ISE determination of concentrations for each specific ion has specific features caused by the subject: the use of nanostructured TCNQ for ion-selective K^+ and Na^+ electrodes [24], the use of flash chronopotentiometry at polymer membrane ion-selective electrodes to measure total calcium [25], introduction of new linkers for sodium selective potentiometric sensors [26].

For researching an ecological condition of objects of environment use ISE measuring, which are serially issued, for example, "ELIS-121K", "ELIS-112Na", "ELIS-121Ca", and comparative silver chloride electrodes standard or with a double electrochemical key, for example, electrode "Esr-10101".

Ion-selective automated systems measurement of potassium, sodium and calcium. To determine the concentrations of K^+ , Na^+ and Ca^{2+} ions in the electrolytes of body fluids, bioanalyzers and spectrometers of various designs are mainly used, for example, Agilent 2100 bioanalyzer and Agilent 7500 ICP-MS spectrometer (Hewlett-Packard), bioanalyzers DS-261, DS-401, BS3000M (Dialab, Austria) and others. Specialized systems for measuring potassium using an array of ion-selective electrodes controlled by a microcomputer [27], sodium in a wireless ion-selective electrode system [28, 29], total sodium and potassium in surface and groundwater using a flame photometer [30], for real-time ion monitoring [31] and many others.

To ensure control of the concentrations of these chemical elements in the investigated solutions, it is necessary to increase the reliability and accuracy of determining their concentrations. Since the performance of electrochemical studies and determination of concentrations of chemical elements: sodium, potassium, calcium, is the most relevant for the tasks of determining the quality of drinking water, the task was to develop methods and algorithms for determining these elements in drinking water.

The purpose of the paper is to develop a method and algorithm for processing data measuring alkali and alkaline earth metal concentrations for a new electrochemical method of analysis — chronoionometry, the principle of which is based on the application of direct potentiometry on the device for inversion chronopotentiometry.

FUNDAMENTALS OF THE CHRONIONOMETRIC METHOD OF DETERMINATION OF CONCENTRATION

The method of ionometry is based on the principle of potentiometric analysis, according to which the measurement of the potential difference (electromotive force — EMF) between the electrodes is carried out. The essence of the method is to determine the activity (concentration) of ions in the mode of direct potentiometry using measuring ISE and comparative silver chloride electrodes. During operation, ISE selectively responds to a certain type of ions, and there is a linear dependence of the EMF of the electrode system on the concentration of ions, according to the Nernst equation [14].

Determination of the concentrations of the elements in the solution is carried out by the method of calibration graph or additives of a standard solution of ions of the element. The main disadvantage of the calibration graph method is the significant complication of the process of reproducibility of the analysis results, which requires constant conditions for calibration, validation and measurement of the ionic strength of the solution.

The method of additives is more reliable and accurate. Depending on the type of processing of the results of ion concentration measurements, the standard additive method or the Gran method are used [32]. The disadvantages of these methods are the use in the formulas for calculating the concentration of the steepness of the electrode function of the calibration graph, which requires its prior careful construction or solution of certain transcendental equations. In practice, the method of multiple additives (SBD) of a standard solution of element ions with the calculation of concentrations by the Gran method using the steepness of the obtained linear electrode function of the calibration graph and the values of the mass of additives.

On the device for measuring the parameters of aqueous solutions [33], implemented on the "Analyzer SCP", the process of determining the potentials by chronoionometric analysis is performed as follows. During the measurement, an electrolyzer with a sample solution is used, which is installed on a magnetic stirrer, with constant slow stirring of the solution. At a speed of 4 KHz read the values of potentials in the measurement cycle lasting one second for a given period of measurement time T . In this case, in the first half of the cycle the signal is stored, and in the second half of the cycle the obtained values are processed and determined by the potential E in the cycle measurement. The obtained values of $E(t)$ in real time in the form of chronopotentiograms are displayed (Fig. 1), which allows to monitor the process of determining the constant potential and allows to increase the reliability of determining the concentrations of element ions in the sample solution.

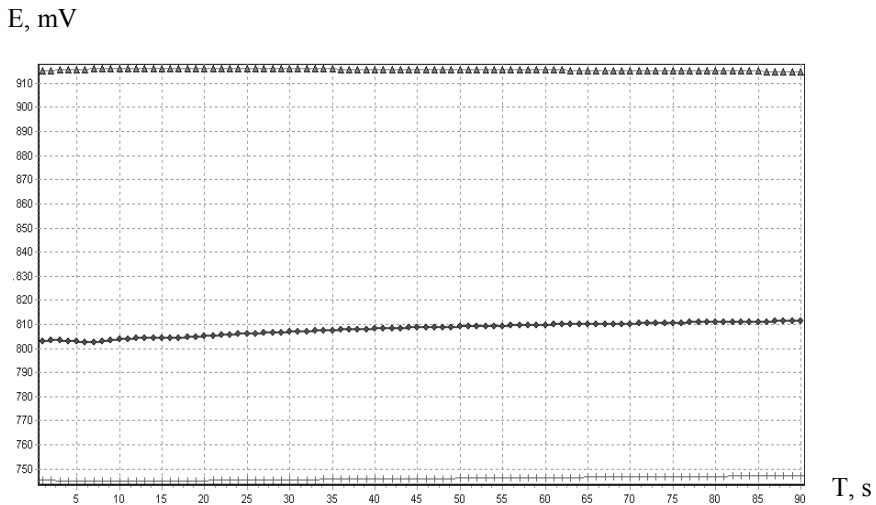


Fig. 1. Chronopotentiogram of potassium ion potential measurement

ALGORITHM OF DATA PROCESSING BY THE METHOD OF CHRONIONOMETRY

The developed algorithm consists of five steps: construction of a linear calibration graph at two points; measuring the potential in the sample solution; determination of the mass of the additive; measuring the potential in the sample solution with the additive and calculating the concentration by the method SBD.

To describe the features of the proposed algorithm, consider measuring the concentration of potassium ions in a model solution of potassium chloride: a standard solution of $C_{KCl} = 1 \cdot 10^{-4}$ M KCl mol /dm³ with a concentration of potassium ions $C_K = 3.91$ mg/dm³.

Step 1. Construction of a linear calibration graph at two points. When determining the concentration by the method of multiple standard additives, the calibration graph is based on two values of the extreme points of the ISE measurement range. Thus, to determine the concentration of potassium ions C_K use calibration solutions of $1 \cdot 10^{-5}$ and $1 \cdot 10^{-2}$ M KCl mol/dm³, measuring ion-selective electrode and silver chloride electrode with a double electrolytic key. During the time $T = 60$ s, the chronopotentiogram $E(t)$ is read and displayed. According to the values of the potentials of the endpoints of the chronopotentiogram, a calibration graph is constructed at two points to determine the concentration of the KCl solution (Fig. 2).

The vertical line shows the maximum permissible value (MPV) of potassium in drinking water ($MPV_K = 20$ mg/dm³, $pK = -\lg C = 3,29$), which allows a qualitative visual assessment of ion concentrations in the sample solution.

According to the calibration graph, the steepness of the electrode function S of the linear dependence $E = E_0 + S \cdot pC$ of the potential change from the ion activity index $pC = -\lg C$ is calculated.

For this example, the equation of the linear electrode characteristic (1) is obtained in the form: $E = 1046.2 - 53.75 \cdot pK$, the inverse linear equation will be: $pK = 19.246 - 0.0186 \cdot E$.

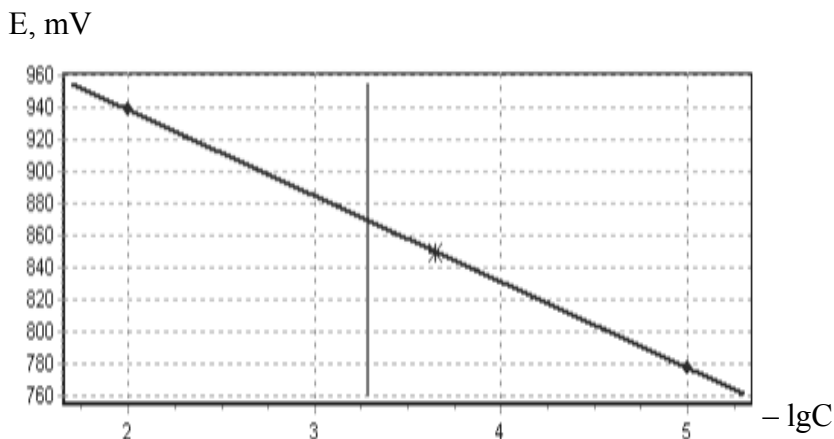


Fig. 2. The calibration curve for the two points

Step 2. Measurement of the potential in the sample solution. Perform measurement of the constant value of the potential of the model solution $C_{KCl} = 1 \cdot 10^{-4}$ M KCl with constant stirring for a given time of measurement T and calculate the inverse equation of the electrode characteristics of the molar concentration of the solution $C_{KCl} = 10^{-pK}$ (mol/dm³), mass concentration ion $C_K = M \cdot 10^{-pK}$, where M is the molar mass of the potassium ion (39100 mg/dm³), and reflect the sign "*" in Fig. 2.

For our example we obtain: sample potential $E_S = 850$ mV; $pK = 3.65$, which corresponds to the concentration of potassium ions $C_K = 8.76$ mg/dm³ and the molar concentration of the model solution $C_{KCl} = 2.24 \cdot 10^{-4}$ M KCl. The result of measuring potassium ions in the model solution according to the calibration graph at two points was obtained with a significant relative error.

Step 3. Determining the weight of the additive. Based on the value of C_{KCl} determine the concentration of the standard solution and the corresponding mass of the addition of ions of the element so that it was half-order or an order of magnitude greater. For a model sample with a volume of 10 cm³ the concentration of the standard solution of the additive will be $C_{KCl} = 1 \cdot 10^{-2}$ M KCl, which corresponds to the mass of the addition of potassium ions $M_K = 391$ μ g.

Step 4. Measurement of the potential in the sample solution with the additive. Add sample M_K standard solution of potassium ions to the solution and determine the constant value of the sample potential with the additive, repeating the measurement process for five additives, without changing the volume and weight of the additive. If the potential values in the sample or the sample with the additive are unstable, the measurement is repeated.

Step 5. Calculation of concentration by the method of multiple additives. According to the measurement results, the values of the potential difference between the potential are formed E_{Addj} of the current additive and the average potential E_S of the sample: $\Delta E_j = E_{Addj} - E_S$, which correspond to the increasing values of the mass of the ion additive $M_j = M_{j-1} + M_K$ in solution samples with additives. The values of ΔE_j and $(-\lg M_j)$ are processed by the method of least squares, the direct and inverse linear dependence of the potential difference on the logarithm of the additive mass is obtained. According to the order of

processing the results of measurements of concentrations by the method of Gran, the obtained linear graph is extrapolated to the intersection with the abscissa and determine the value $(-\lg M_S)$, which corresponds to the initial concentration of ion element M_S in the sample solution without additives. The graph of the linear dependence of the potential difference from the logarithm of the mass for the five additives is shown in Fig. 3.

The values of the additive mass M_i are corrected by increasing them by the value of the ion mass of the element $M_j = M_j + M_S$, to obtain the actual ion mass when measuring the sample with the additive.

Calculate the concentration of ions of the element $C_j = M_j / V$ according to the values of the mass M_j and the volume of the solution of the sample V (for example, 0.01 dm^3) for the sample C_S and the sample with the addition of C_{Adj} .

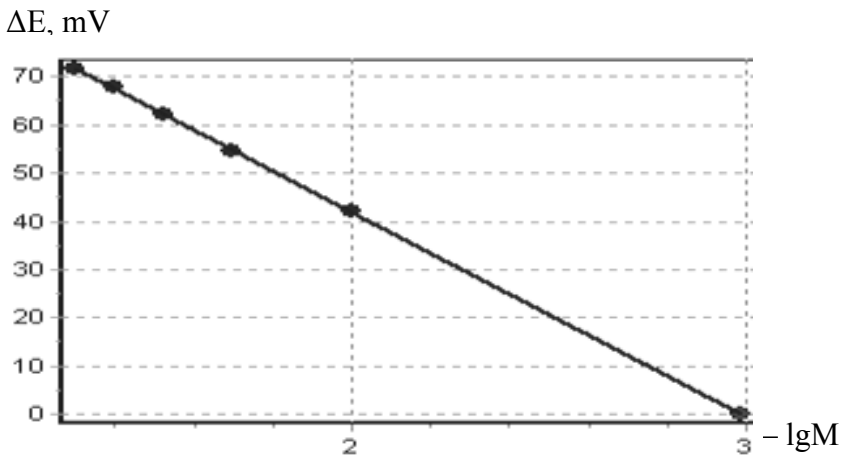


Fig. 3. Dependence of the potential difference on the logarithm of the mass for five additives

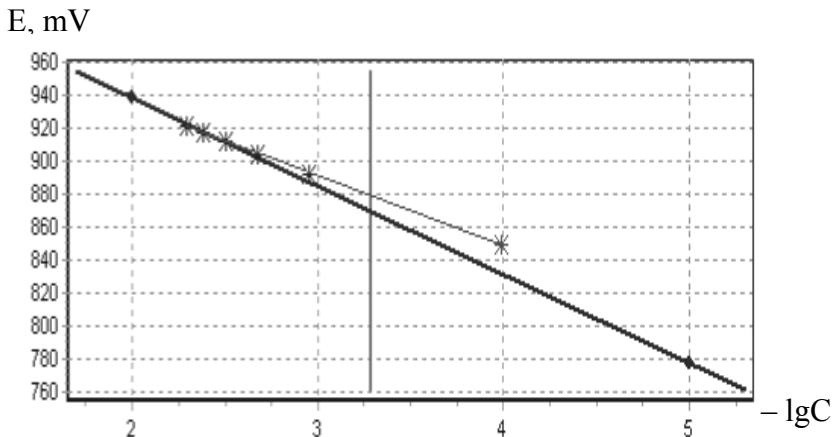


Fig. 4. Electrode characteristic of potassium concentration measurement for five additives

Using the measurement potentials E_S , E_{Adj} and the values of C_S , C_{Adj} are calculated by the method SBD, the coefficients of the forward and inverse linear electrode characteristics of the measurement of element ions by the method of multiple standard additives. The graph of the electrode characteristics for the five additives is shown in Fig. 4.

For our example of measuring potassium ions with five additives, the electrode characteristic will be written as: $E = 1018.3 - 42.30 \cdot pK$, and the inverse relationship will be: $pK = 24.071 - 0.0236 \cdot E$. The inverse relationship for sample potential $E_S = 850$ mV the concentration of potassium ions will be $C_K = 4.01$ mg/dm³, the molar concentration of the solution $C_{KCl} = 1,027 \cdot 10^{-4}$ M KCl. Thus, the result of measuring the concentration by chronoionometry by the method of multiple standard additives was determined with a relative error of 2.7 %, which is much better than the result obtained by the calibration graph.

The algorithm for processing concentration measurement data by chronoionometry has the ability to select specific potential measurements and not take into account unstable potential values. Choose to calculate the concentration of only the first three additives, then the dependence of the electrode characteristic will be $E = 1015.8 - 41.52 pK$, and the inverse dependence $pK = 24.464 - 0.0241 \cdot E$. The graph of the linear dependence by the Gran method is shown in Fig. 5 and a graph of the electrode characteristics for the three additives is shown in Fig. 6.

For the sample potential $E_S = 850$ mV concentration of potassium ions will be $C_K = 3.91$ mg/dm³ and the molar concentration of $C_{KCl} = 1.001 \cdot 10^{-4}$ M KCl. The result of measuring the concentration by the method of chronoionometry with three additives was determined with a relative error of 0.1%, which is better than the previous results.

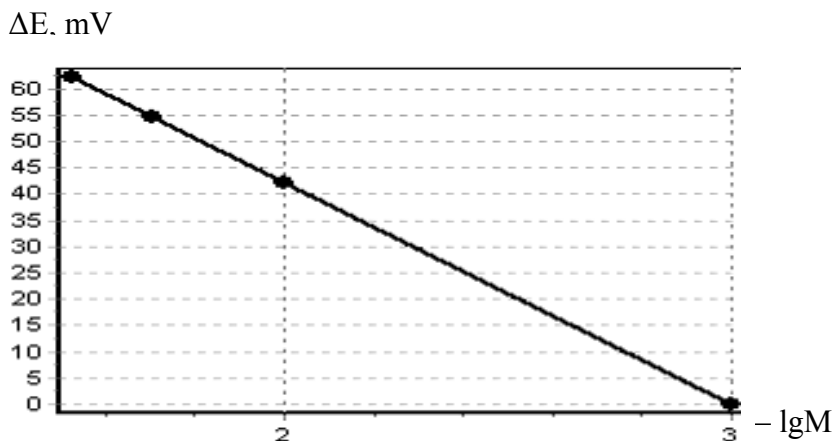


Fig. 5. Dependence of the potential difference on the logarithm of the mass for three additives

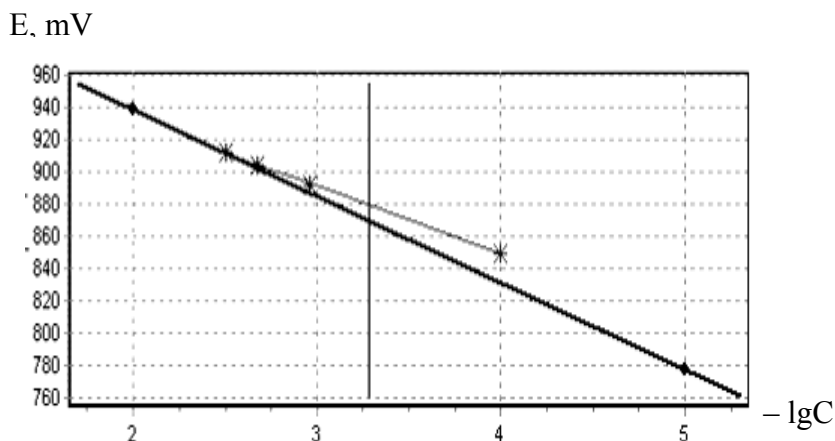


Fig. 6. Electrode characteristic of potassium concentration measurement for three additives

Performing measurements by the method of multiple standard additives improves the controllability of the analysis results, increases the reliability and accuracy of determination of concentrations.

IMPLEMENTATION OF THE ALGORITHM IN INFORMATION TECHNOLOGY AND CONCENTRATION MEASUREMENT DEVICES

To measure the potentials, a high resistance was added to the reading channel and an auxiliary chlorine-silver electrode with a double electrolytic key was developed, which showed better characteristics for the CHI method compared to the electrode "Esr-10101".

The analytical system "Analyzer SCP" includes a total of five electrochemical research methods: the

- stripping chronopotentiometry (SCP),
- pulse stripping chronopotentiometry (PSCP) [4],
- differential pulse stripping chronopotentiometry (DPSCP),
- oxidative pulse stripping chronopotentiometry (OPSCP),
- chronoionometric method (CHI) [33].

The developed data processing algorithm for the new chronoionometric method of analysis is implemented in the form of a subsystem, which has become an integral part of the information technology software of the device "Analyzer SCP".

The results of measuring the concentrations of chemical elements by the method of chronoionometry and auxiliary parameters: the value of ion activity to determine their relationship with the concentration of elements at points in the measurement range and other ISE parameters; coordinates of calibration points of calibration graphs of ISE — all these values are stored in the general database of information technology that considerably accelerates adjustment of the device before the beginning of measurement of concentrations.

The main window of the subsystem for determining concentrations by the method of chronoionometry is given in Fig. 7.

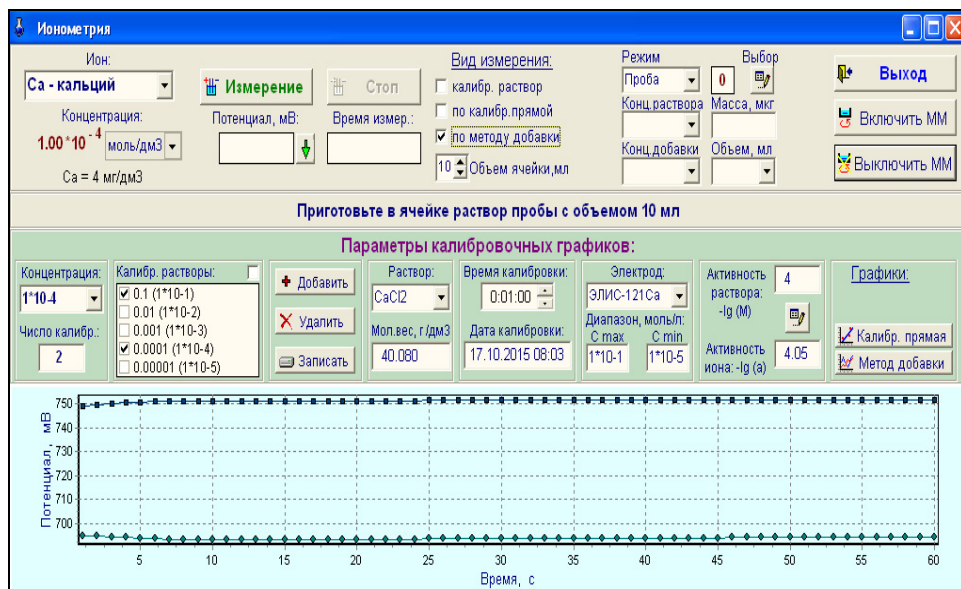


Fig. 7. The main window of the program for determining the concentrations of chemical elements by chronoionometry (Calibration curves for measuring calcium)

The subsystem implements two approaches to determining concentrations by chronoionometry:

1. The method of calibration graph.
2. The method of reusable standard additives.

The use in one device of determining the concentrations of toxic elements by the methods of SCP, PSCP, DPSCP, OPSCP and the new method CHI allows to significantly expand the number of chemical elements analyzed. At the same time, for the method of chronoionometry the clarity of the research is increased, the control of the measurement stability is improved by taking into account the statistically large number of potential values read from the ISE. The calculation of the electrode characteristic by the method of multiple standard additives and its display together with the calibration graph, as well as the ability to select the required potentials of the additive to calculate concentrations, all significantly improves the process of measuring concentrations compared to existing technologies in ionometry.

The use of these methods allows the "Analyzer SCP" to measure the concentration of 17 chemical elements (Hg, As, Pb, Cd, Cu, Zn, Sn, Ni, Co, Se, Mn, I, Cr, Fe, K, Na, Ca) in the environment and in drinking water. The use of the CHI method allows to determine the content of K, Na and Ca without sample preparation, which significantly increases the expressiveness and ease of analysis of these elements.

The results of measuring the concentrations of chemical elements and auxiliary parameters of the CHI method: the value of ion activity to determine their relationship with the concentration of elements and other parameters of ISE; the coordinates of the calibration points of the calibration graphs of the electrodes are stored in the general database of the device, which significantly speeds up its adjustment before the measurement of concentrations. At the same time, the visibility increases and the control of measurement stability is improved by taking into account a statistically large number of potential values read from the electrodes.

The calculation of the electrode characteristic by the method of multiple standard additives and its display together with the calibration graph, as well as the ability to select the required additive potentials for calculating concentrations, all significantly improves the measurement process compared to existing technologies in ionometry.

To determine the concentrations of K^+ , Na^+ , Ca^{2+} ions in water, methods for measuring chemical elements have been developed, confirmed by patents: a device for determining the concentration by CHI [33], a method for determining calcium in aqueous solutions [34], sodium [35] and potassium [36]. These methods have significant scientific value for the development of electrochemical methods of analysis, and can also be used in chemical technology, biotechnology and environmental analysis.

The effectiveness of the described chronoionometric method for determining the concentrations of trace elements potassium, sodium and calcium in drinking water is proved by comparison with the characteristics of analytical systems developed in other countries.

ANALYSIS ACCURACY ALGORITHM MEASUREMENT OF CONCENTRATIONS CHRONOIONOMETRYCHNYM ANALYSIS METHOD

In accordance with hygienic standards, assessment of safety and quality of drinking water is carried out according to epidemic safety indicators, sanitary-chemical and radiation indicators. The main principle of practical implementation of chronoionometry methods in determining the quality of drinking water is that the measurement should provide a reliable determination of the concentrations of chemical elements below the maximum allowable concentrations of MPV.

Table 1 shows the normative values of the MPV in Ukraine for chemical elements and ranges of measurement of concentrations, according to the methods of measurement in water: 1 — tap; 2 — from wells and catchments of springs; 3 — packed up from filling points, ditches; 4 — water of the central drinking water supply; 5 — water of non-central drinking water supply.

At low levels of physiological value of the mineral composition of drinking water (below the minimum limit of optimal value) packaged drinking water (at bottling points) can be treated, but within the limits specified in Table 1.

In the process of preparation of methods for measuring potassium, sodium and calcium ions in water, a study was conducted and the relative errors of concentration measurements were calculated for the series of additives to model solutions, which indicate the accuracy of concentrations by chronoionometry (Table 2).

According to the above data, the relative measurement error of the concentration of potassium, sodium, calcium ions in water is in the range of values from 2.4 % to 16.4 %, which is less than the normalized relative measurement error of 20 %.

Methodological support for measuring the concentrations of potassium, sodium, calcium ions by chronoionometric method in cooperation with the International Research and Training Center for Information Technologies and Systems of NAS of Ukraine and MES of Ukraine and the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine [37].

Table 1. Sanitary and chemical indicators of safety and quality of drinking water

Element	Maximum concentration limit for drinking water (mg/dm ³), no more than					Optimal value within ³⁾ mg/dm ³	Measurement ranges "Analyzer SCP" mg/dm ³
	1 ¹⁾	2 ¹⁾	3 ¹⁾	4 ²⁾	5 ²⁾		
Potassium (K)	-	-	-	-	20	2 – 20	0,4 – 3900
Sodium (Na) ⁴⁾	200	-	200	200	200	2 – 20	2,3 – 2300
Calcium (Ca)	-	-	130	-	130	25 – 75	0,4 – 4100

Notes:

¹⁾ DSanPiN 2.2.4-171-10 "Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption"

²⁾ DSTU 7525: 2014 Drinking water. Requirements and methods of control (water of centralized and decentralized drinking water supply)

³⁾ Optimal values of indicators of physiological completeness of mineral composition of drinking water

⁴⁾ Substances of the II class of danger (degree of danger to the person of chemical substances polluting water depending on their toxicity, limiting signs of harm and the ability to cause adverse long-term effects)

Table 2. Parameters and errors of measurements of elements in model solutions

№ samples	Set concentration		Results		
			Measured concentration		Relative error
	mol/dm ³	µg/cm ³	mol/cm ³	µg/cm ³	%
1	2	3	4	5	6
Potassium (K)					
	KCl	K ⁺	KCl	K ⁺	2.7
1	0.0001	3.91	0.0001027	4.01	2.7
2	0.001	39.1	0.001052	41.1	5.2
3	0.01	391.0	0.00889	347.6	11.1
Sodium (Na)					
	NaCl	Na ⁺	NaCl	Na ⁺	
1	0.0001	2.3	0.000111	2.55	11.0
2	0.001	23.0	0.001024	23.6	2.4
3	0.01	230.0	0.00836	192.2	16.4
Calcium (Ca)					
	CaCl	Ca ²⁺	CaCl	Ca ²⁺	
1	0.0001	4.008	0.0000962	3.85	3.8
2	0.001	40.08	0.001077	43.2	7.7
3	0.01	400.8	0.00880	352.8	12.0

Potential consumers analytical system "Analyzer SCP" are:

- control and diagnostic laboratories Ministry of Agriculture, Ministry of Health, Ministry of Environment and Natural Resources,
- laboratories of quality and certification of agricultural products,
- control and production laboratories of food industry enterprises,
- centralized water supply laboratories,
- educational and scientific chemical and ecological laboratories of educational institutions,
- laboratories of product quality.

The proposed technology for measuring the concentrations of potassium, sodium and calcium in water can be used to determine the concentrations of electrolytes in the study of body fluids (whole blood, serum, plasma, urine).

CONCLUSIONS

The main principle of practical implementation of chronoionometry methods during toxicological research is reliable measurement of potassium, sodium, calcium ions in determining the safety of drinking water and human quality for the prevention of the most common diseases, the use of biological fluids in digital medicine and study of possibilities of improvement of methods of diagnostics of the person with use of results of the analysis of ions of other toxic chemical elements and connections.

Validation of the methodology and verification of the analytical system "Analyzer SCP" showed that they fully meet the technical and regulatory requirements and are suitable for quantitative determination of the mass concentration of potassium, sodium, calcium ions in drinking water and water of various natural origin.

The developed method of chronoionometric measurement of ions in different media can be extended to other chemical elements: fluorine, chlorine, nitrates, ammonium and other inorganic and organic compounds for which there are ion-selective electrodes.

REFERENCES

1. Rao NS, Devadas DJ (2005) Quality criteria for ground water use for development on an area. *J. Appl Geochem* 7:9–24.
2. Narayana TS, Prasad BG (2006) Hydrogeological study of subsurface waters. *Nature Environ Pollut Technol* 5:459–461.
3. Jakhriani AQ (2009) Impact of wastewater effluents on physico-chemical properties of groundwater. *Sindh Univ Res J Sci Ser* 41:75–82.
4. Device for measuring the concentration of toxic elements: pat. 107412, Ukraine: IPC. G01N 27/48. № a201306295; claimed 21.05.2013; published 25.12.2014, Bull. № 24. (in Ukrainian)
5. Surovtsev I.V., Galimov S.K., Tatarinov O.E. Information technology for determining the concentration of toxic elements in environmental objects. *Kybernetika i vyčislitel'naâ tehnika*. 2018. № 1(191). C. 5–33. (in Ukrainian)
6. 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.
7. 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.
8. Mank V., Tonkha O., Galimova V., Surovtsev I., Menshov O., Bukova O., Rogovsky I. Electrochemical investigation of cobalt absorption processes by soils of Ukraine. "*Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*". 2019. № 3 (86). P. 34–39.

9. Singh, G.; Iyer, E.M.; Malik, H. Relative changes in salivary sodium and potassium in relation to exposure to high G stress. *Med. J. Armed Forces India* 1994, 50, 261–265.
10. Labat C., Thul S., Pirault J., Temmar M., Thornton S.N., Benetos A., Bäck M. Differential associations for salivary sodium, potassium, calcium, and phosphate levels with carotid intima media thickness, heart rate, and arterial stiffness. *Dis. Markers* 2018, 2018, 3152146.
11. Lee, Y.; Howe, C.; Mishra, S.; Lee, D.S.; Mahmood, M.; Piper, M.; Kim, Y.; Tieu, K.; Byun, H.-S.; Coffey, J.P. Wireless, intraoral hybrid electronics for real-time quantification of sodium intake toward hypertension management. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2018, 115, 5377–5382.
12. Gonçalves, A.C.; Marson, F.A.L.; Mendonça, R.M.H.; Bertuzzo, C.S.; Paschoal, I.A.; Ribeiro, J.D.; Ribeiro, A.F.; Levy, C.E. Chloride and sodium ion concentrations in saliva and sweat as a method to diagnose cystic fibrosis. *J. Pediatr.* 2019, 95, 443–450.
13. Shvarev A. Bakker A. Distinguishing free and total calcium with a single pulsed galvanostatic ionselective electrode. *Talanta*. 2004. Vol. 63, 195–200.
14. Umezawa, Y.; Bühlmann, P.; Umezawa, K.; Tohda, K.; Amemiya, S. Potentiometric selectivity coefficients of ion-selective electrodes. Part I. Inorganic cations (technical report). *Pure Appl. Chem.* 2000, 72, 1851–2082.
15. Papp S., Bojtár, M., Gyurcsányi R.E.E., Lindfors T. Potential reproducibility of potassium-selective electrodes having perfluorinated alkanooate side-chain functionalized poly (3, 4-ethylenedioxythiophene) as hydrophobic solid contact. *Anal. Chem.* 2019, 91, 9111–9118.
16. Zhu, J.; Qin, Y.; Zhang, Y. Preparation of all solid-state potentiometric ion sensors with polymer-CNT composites. *Electrochem. Commun.* 2009, 11, 1684–1687.
17. Guinovart, T.; Crespo, G.A.; Rius, F.X.; Andrade, F.J. A reference electrode based on polyvinyl butyral (PVB) polymer for decentralized chemical measurements. *Anal. Chim. Acta* 2014, 821, 72–80.
18. Roy, S.; David-Pur, M.; Hanein, Y. Carbon nanotube-based ion selective sensors for wearable applications. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2017, 9, 35169–35177.
19. Al-Alamein, A.M.A.; Kamel, M.S.; El-Alamin, M.M.A.; Khaled, E. Novel pioglitazone nano-material based screen printed sensors. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2015, 10, 2400–2412.
20. Chen, X.; Hu, Q.; Chen, S.; Netzer, N.L.; Wang, Z.; Zhang, S.-L.; Zhang, Z. Multiplexed analysis of molecular and elemental ions using nanowire transistor sensors. *Sens. Actuators B Chem.* 2018, 270, 89–96.
21. Stekolshchikova, A.A.; Radaev, A.V.; Orlova, O.Y.; Nikolaev, K.G.; Skorb, E.V. Thin and flexible ion sensors based on polyelectrolyte multilayers assembled onto the carbon adhesive tape. *ACS Omega* 2019, 4, 15421–15427.
22. Wang, S.; Bai, Y.; Yang, X.; Liu, L.; Li, L.; Lu, Q.; Li, T.; Zhang, T. Highly stretchable potentiometric ion sensor based on surface strain redistributed fiber for sweat monitoring. *Talanta* 2020, 214, 120869.
23. Parrilla, M.; Ferré, J.; Guinovart, T.; Andrade, F.J. Wearable potentiometric sensors based on commercial carbon fibres for monitoring sodium in sweat. *Electroanalysis* 2016, 28, 1267–1275.
24. Paczosa-Bator, B.; Pišek, M.; Piech, R. Application of nanostructured TCNQ to potentiometric ion-selective K⁺ and Na⁺ electrodes. *Anal. Chem.* 2015, 87, 1718–1725.
25. Gemene Kebede L. Bakker E. Measurement of total calcium by flash chronopotentiometry at polymer membrane ion-selective electrodes. *Analytica Chimica Acta*. 2009. Vol. 648, 240–245.
26. Luboch E., Jeszke M., Szarmach M., Łukasik N. New bis(azobenzocrown)s with dodecylmethylalonyl linkers as ionophores for sodium selective potentiometric sensors. *J. Incl. Phenom. Macrocycl. Chem.* 2016, 86, 323–335.
27. J. Braz. Simultaneous Determination of Chloride and Potassium in Carbohydrate Electrolyte Beverages Using an Array of Ion-Selective Electrodes Controlled by a Microcomputer. *Chem. Soc. vol.11 n.4 São Paulo July/Aug. 2000.* <https://doi.org/10.1590/S0103-50532000000400004>
28. Hyo-Ryoung Lim, Yun-Soung Kim, Shinjae Kwon, Musa Mahmood, Young-Tae Kwon, Yongkuk Lee, Soon Min Lee and Woon-Hong Yeo. Wireless, flexible, ion-selective electrode system for selective and repeatable detection of sodium. *Sensors* 2020, 20(11), 3297; <https://doi.org/10.3390/s20113297>

29. Matzeu, G.; O'Quigley, C.; McNamara, E.; Zuliani, C.; Fay, C.; Glennon, T.; Diamond, D. An integrated sensing and wireless communications platform for sensing sodium in sweat. *Anal. Methods* 2016, 8, 64–71.
30. Payal Banerjee, Bably Prasad. Determination of concentration of total sodium and potassium in surface and ground water using a flame photometer. *Applied Water Science*. (2020) 10:113.
31. An, Q.; Gan, S.; Xu, J.; Bao, Y.; Wu, T.; Kong, H.; Zhong, L.; Ma, Y.; Song, Z.; Niu, L. A multichannel electrochemical all-solid-state wearable potentiometric sensor for real-time sweat ion monitoring. *Electrochem. Commun.* 2019, 107, 106553.
32. Li H. Computer approach to ion-selective electrode potentiometry by two standard additions and subtractions methods through ionic strength calibration. *Analyst*. 1987, V.112, № 11, 1607–1612.
33. Device for measuring parameters of aqueous solutions: pat. 111689, Ukraine: IPC. G01N 27/48. № a201505019; claimed 22.05.2015; published 25.05.2016, Bull. № 10. (in Ukrainian)
34. 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 13.11.2015; published 12.12.2016, Bull. № 23. (in Ukrainian).
35. 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 13.11.2015; published 26.12.2016, Bull. № 24. (in Ukrainian).
36. 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. № a201511152; claimed 13.11.2015; published 10.01.2017, Bull. № 1. (in Ukrainian).
37. 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).

Received 07.09.2020

ЛІТЕРАТУРА

1. Rao NS, Devadas DJ (2005) Quality criteria for ground water use for development on an area. *J Appl Geochem* 7:9–24.
2. Narayana TS, Prasad BG (2006) Hydrogeological study of subsurface waters. *Nature Environ Pollut Technol* 5:459–461.
3. Jakhrani AQ (2009) Impact of wastewater effluents on physico-chemical properties of groundwater. *Sindh Univ Res J Sci Ser* 41:75–82.
4. Пристрій для вимірювання концентрації токсичних елементів: пат. 107412, Україна: МПК. G01N 27/48. № a201306295; заявл. 21.05.2013; опубл. 25.12.2014, Бюл. № 24.
5. Суровцев І.В., Галімов С.К., Татарінов О.Е. Інформаційна технологія визначення концентрації токсичних елементів в об'єктах навколишнього середовища. *Кибернетика и вычисл. техника*. 2018. № 1(191). С. 5–33.
6. 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.
7. 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.
8. Mank V., Tonkha O., Galimova V., Surovtsev I., Menshov O., Bukova O., Rogovsky I. Electrochemical investigation of cobalt absorption processes by soils of Ukraine. *"Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology"*. 2019. № 3 (86). P. 34–39.
9. Singh, G.; Iyer, E.M.; Malik, H. Relative changes in salivary sodium and potassium in relation to exposure to high G stress. *Med. J. Armed Forces India* 1994, 50, 261–265.
10. Labat C., Thul S., Pirault J., Temmar M., Thornton S.N., Benetos A., Bäck M. Differential associations for salivary sodium, potassium, calcium, and phosphate levels with carotid intima media thickness, heart rate, and arterial stiffness. *Dis. Markers* 2018, 2018, 3152146.

11. Lee, Y.; Howe, C.; Mishra, S.; Lee, D.S.; Mahmood, M.; Piper, M.; Kim, Y.; Tieu, K.; Byun, H.-S.; Coffey, J.P. Wireless, intraoral hybrid electronics for real-time quantification of sodium intake toward hypertension management. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2018, 115, 5377–5382.
12. Gonçalves, A.C.; Marson, F.A.L.; Mendonça, R.M.H.; Bertuzzo, C.S.; Paschoal, I.A.; Ribeiro, J.D.; Ribeiro, A.F.; Levy, C.E. Chloride and sodium ion concentrations in saliva and sweat as a method to diagnose cystic fibrosis. *J. Pediatr.* 2019, 95, 443–450.
13. Shvarev A. Bakker A. Distinguishing free and total calcium with a single pulsed galvanostatic ionselective electrode. *Talanta.* 2004. Vol. 63, 195–200.
14. Umezawa, Y.; Bühlmann, P.; Umezawa, K.; Tohda, K.; Amemiya, S. Potentiometric selectivity coefficients of ion-selective electrodes. Part I. Inorganic cations (technical report). *Pure Appl. Chem.* 2000, 72, 1851–2082.
15. Papp S., Bojtár, M., Gyurcsányi R.E.E., Lindfors T. Potential reproducibility of potassium-selective electrodes having perfluorinated alkanooate side-chain functionalized poly (3, 4-ethylenedioxythiophene) as hydrophobic solid contact. *Anal. Chem.* 2019, 91, 9111–9118.
16. Zhu, J.; Qin, Y.; Zhang, Y. Preparation of all solid-state potentiometric ion sensors with polymer-CNT composites. *Electrochem. Commun.* 2009, 11, 1684–1687.
17. Guinovart, T.; Crespo, G.A.; Rius, F.X.; Andrade, F.J. A reference electrode based on polyvinyl butyral (PVB) polymer for decentralized chemical measurements. *Anal. Chim. Acta* 2014, 821, 72–80.
18. Roy, S.; David-Pur, M.; Hanein, Y. Carbon nanotube-based ion selective sensors for wearable applications. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2017, 9, 35169–35177.
19. Al-Alamein, A.M.A.; Kamel, M.S.; El-Alamin, M.M.A.; Khaled, E. Novel pioglitazone nanomaterial based screen printed sensors. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2015, 10, 2400–2412
20. Chen, X.; Hu, Q.; Chen, S.; Netzer, N.L.; Wang, Z.; Zhang, S.-L.; Zhang, Z. Multiplexed analysis of molecular and elemental ions using nanowire transistor sensors. *Sens. Actuators B Chem.* 2018, 270, 89–96.
21. Stekolshchikova, A.A.; Radaev, A.V.; Orlova, O.Y.; Nikolaev, K.G.; Skorb, E.V. Thin and flexible ion sensors based on polyelectrolyte multilayers assembled onto the carbon adhesive tape. *ACS Omega* 2019, 4, 15421–15427.
22. Wang, S.; Bai, Y.; Yang, X.; Liu, L.; Li, L.; Lu, Q.; Li, T.; Zhang, T. Highly stretchable potentiometric ion sensor based on surface strain redistributed fiber for sweat monitoring. *Talanta* 2020, 214, 120869.
23. Parrilla, M.; Ferré, J.; Guinovart, T.; Andrade, F.J. Wearable potentiometric sensors based on commercial carbon fibres for monitoring sodium in sweat. *Electroanalysis* 2016, 28, 1267–1275.
24. Paczosa-Bator, B.; Piętek, M.; Piech, R. Application of nanostructured TCNQ to potentiometric ion-selective K⁺ and Na⁺ electrodes. *Anal. Chem.* 2015, 87, 1718–1725.
25. Gemene Kebede L. Bakker E. Measurement of total calcium by flash chronopotentiometry at polymer membrane ion-selective electrodes. *Analytica Chimica Acta.* 2009. Vol. 648, 240–245.
26. Luboch E., Jeszke M., Szarmach M., Łukasik N. New bis(azobenzocrown)s with dodecylmethylmalonyl linkers as ionophores for sodium selective potentiometric sensors. *J. Incl. Phenom. Macrocycl. Chem.* 2016, 86, 323–335.
27. J. Braz. Simultaneous Determination of Chloride and Potassium in Carbohydrate Electrolyte Beverages Using an Array of Ion-Selective Electrodes Controlled by a Microcomputer. *Chem. Soc. vol.11 n.4 São Paulo July/Aug.* 2000. <https://doi.org/10.1590/S0103-5053200000400004>
28. Hyo-Ryoung Lim, Yun-Soung Kim, Shinjae Kwon, Musa Mahmood, Young-Tae Kwon, Yongkuk Lee, Soon Min Lee and Woon-Hong Yeo. Wireless, flexible, ion-selective electrode system for selective and repeatable detection of sodium. *Sensors* 2020, 20(11), 3297; <https://doi.org/10.3390/s20113297>
29. Matzeu, G.; O’Quigley, C.; McNamara, E.; Zuliani, C.; Fay, C.; Glennon, T.; Diamond, D. An integrated sensing and wireless communications platform for sensing sodium in sweat. *Anal. Methods* 2016, 8, 64–71.
30. Payal Banerjee, Bably Prasad. Determination of concentration of total sodium and potassium in surface and ground water using a flame photometer. *Applied Water Science.* (2020) 10:113.

31. An, Q.; Gan, S.; Xu, J.; Bao, Y.; Wu, T.; Kong, H.; Zhong, L.; Ma, Y.; Song, Z.; Niu, L. A multichannel electrochemical all-solid-state wearable potentiometric sensor for real-time sweat ion monitoring. *Electrochem. Commun.* 2019, 107, 106553.
32. Li H. Computer approach to ion-selective electrode potentiometry by two standard additions and subtractions methods through ionic strength calibration. *Analyst.* 1987, V.112, № 11, 1607–1612.
33. Пристрій для вимірювання параметрів водних розчинів: пат. 111689, Україна: МПК G01N 27/48. № a201505019; заявл. 22.05.2015; опубл. 25.05.2016, Бюл. № 10.
34. 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. № a201511155; заявл. 13.11.2015; опубл. 12.12.2016, Бюл. № 23.
35. 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. № a201511153; заявл. 13.11.2015; опубл. 26.12.2016, Бюл. № 24.
36. 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. № a201511152; заявл. 13.11.2015; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1.
37. Методика виконання вимірювання масової концентрації калію, натрію та кальцію у воді методом хронопотенціометричної іонометрії : МВВ 081/36-1012-2015 / уклад. В.А. Копілевич, І.В. Суровцев, В.М. Галімова. К.: *Нац. ун-т біо-техн. і природокористування*, 2015. 16 с.

Отримано 07.09.2020

Суровцев І.В.¹, д-р техн. наук, старш. наук. співроб.,
зав. відд. екологічних цифрових систем
e-mail: dep115@irtc.org.ua, igorsur52@gmail.com

Великий П.Ю.¹, аспірант,
відд. екологічних цифрових систем
e-mail: velykyi305@gmail.com

Галімова В.М.², канд. хім. наук,
в.о. доцента кафедри аналітичної
та неорганічної хімії та якості води
e-mail: galimova2201@gmail.com

Саркісова М.В.², студентка,
ветеринарний факультет
e-mail: mari.doga2014@gmail.com

¹ Міжнародний науково-навчальний центр
інформаційних технологій та систем
НАН України та МОН України,
40, пр. Акад. Глушкова 03187, м. Київ, Україна

² Національний університет біоресурсів
і природокористування України,
17, корп. 2, вул. Героїв Оборони,
03041, м. Київ, Україна

ІОНОМЕТРИЧНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЙ МІКРОЕЛЕМЕНТІВ У ДОСЛІДЖЕННЯХ ЦИФРОВОЇ МЕДИЦИНИ

Вступ. Використання іонометричних методів хімічного аналізу дає змогу швидко визначити безпечність питної води та концентрації електролітів біологічних рідин організму у дослідженнях цифрової медицини.

Мета статті — розробити алгоритм оброблення даних вимірювання концентрацій лужних та лужноземельних металів новим електрохімічним методом хроноіонометрії, оснований на використанні принципів прямої потенціометрії та іон-селективних електродів на приладі інверсійної хронопотенціометрії.

Методи. Згідно з алгоритмом на приладі зчитують потенціали у часі зі швидкістю 4 КГц, визначають стає значення потенціалу та виводять графік хронопотенціограми для контролю стабільності. За лінійною залежністю різниці потенціалів від логарифма маси добавок знаходять масу елемента у розчині проби та визначають значення концентрації елемента за електродною характеристикою.

Результати. Розроблено метод хроноіонометрії та проведено тестування на приладі інверсійної хронопотенціометрії «Аналізатор ІХП» визначення концентрацій калію, натрію та кальцію в модельних водних розчинах. Аналітична система «Аналізатор ІХП» включає п'ять електрохімічних методів дослідження: метод інверсійної хронопотенціометрії SCP (stripping chronopotentiometry); імпульсний метод PSCP (pulse SCP); диференційний імпульсний метод DPSCP (differential pulse SCP); окислювальний імпульсний метод OPSCP (oxidative pulse SCP); хроноіонометричний метод СНІ (chronoionometric method). Алгоритм оброблення даних вимірювання концентрації методом хроноіонометрії надає можливість виконувати вибір конкретних вимірювань потенціалів та не враховувати нестабільні значення. Виконання вимірювань здійснюється шляхом багаторазових стандартних добавок для забезпечення контрольованості результатів аналізу.

Висновки. Запропонований метод хроноіонометрії покращує наочність та контроль стабільності вимірювання потенціалів, дає змогу вибрати конкретні значення добавок для розрахунку концентрацій, що підвищує надійність та точність вимірювання концентрацій хімічних елементів, розширює функціональні можливості приладу для інверсійної хронопотенціометрії та робить його більш універсальним.

Ключові слова: метод іонометрії, концентрація, іон-селективні електроди, інверсійна хронопотенціометрія, якість питної води, цифрова медицина.

Intelligent Control and Systems

DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt202.04.044>

UDC 004.9+681.5

ODARCHENKO R.S., DSc (Engineering), Associate professor,
Leading Researcher of the Intelligent Control Department,

e-mail: odarchenko.r.s@ukr.net

ORCID: 0000-0002-7130-1375

VOLKOV O.Ye.,

Head of the Intelligent Control Department

e-mail: alexvolk@ukr.net

ORCID: 0000-0002-5418-6723

SIMAKHIN V.M., PhD student,

Junior Researcher of the Intelligent Control Department

e-mail: thevladsima@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4497-0925

SEMENOG R.V., PhD student,

Junior Researcher of the Intelligent Control Department

e-mail: ruslansemenog20@gmail.com

ORCID: 0000-0002-6714-0644

GOSPODARCHUK O.Yu.,

Senior Researcher of the Intelligent Control Department,

e-mail: dep185@irtc.org.ua

ORCID: 0000-0001-6619-2277

International Research and Training Center

for Information Technology and Systems

of National Academy of Sciences of Ukraine

and Ministry of Education and Science of Ukraine,

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

TECHNOLOGY OF INTELLIGENT CONTROL OF UNMANNED AERIAL VEHICLES MONITORING IN THE AIRSPACE USING 5G CELLULAR NETWORKS

***Introduction.** The increasing number of unmanned aerial vehicles (UAVs) in the airspace, as well as the imperfection of the regulatory framework for the regulation of their activities, poses numerous challenges to regulators. This work proposes the development of intelligent technologies and soft-/hardware systems combined with state of the art 5G cellular networks for solving problems of UAV registration and monitoring.*

© ODARCHENKO R.S., VOLKOV O.Ye., SIMAKHIN V.M., GOSPODARCHUK O.Yu., 2020

The purpose of the paper is to analyze the state of the UAV market and related legislation in the world and Ukraine; to develop the technology for intelligent control of UAV monitoring using cellular networks; to prepare guidelines for the implementation and application of the system.

Methods. The methods of data transmission in 5G networks and construction of global distributed IoT networks for the implementation of monitoring technology, methods of data analysis and detection of anomalies for the study of events occurring in the UAV network were used.

Results. The technology of intelligent monitoring of UAVs with the use of a modern 5G cellular network was developed. The use of the fifth generation network provides high data transfer speeds with ultra-low latency and meets all the necessary security requirements. The technology of intelligent control of UAV monitoring consists of separate methods, which are executed in the monitoring center, data processing center and in the supervisory control and data acquisition system. The use of cellular base stations for primary data processing and filtering speeds up the events processing in the UAV network.

Conclusions. The results of the work can be used by civil aviation regulators for monitoring the usage of airspace by unmanned aerial vehicles, as well as for prevention of casualties and emergencies.

Keywords: information technology, monitoring system, registration system, unmanned aerial vehicle, 5G network.

INTRODUCTION

The total market value of unmanned aerial vehicles (UAVs) in the world is estimated at 19.3 billion US dollars and is expected to reach 45.8 billion by the year 2025. The markets of North America and Asia are the most developed and expensive (Fig. 1). Depending on the application, the UAV market is divided into military, commercial, government, law enforcement and consumer segments. Currently, the military market is the most technologically advanced the largest in terms of sales, but the least accessible for the consumers. According to forecasts, the commercial market segment will grow at the maximum average annual rate. This can be explained by the expansion of the range of UAVs application for various commercial purposes, such as product delivery, monitoring, land surveying, cartography and remote sensing.

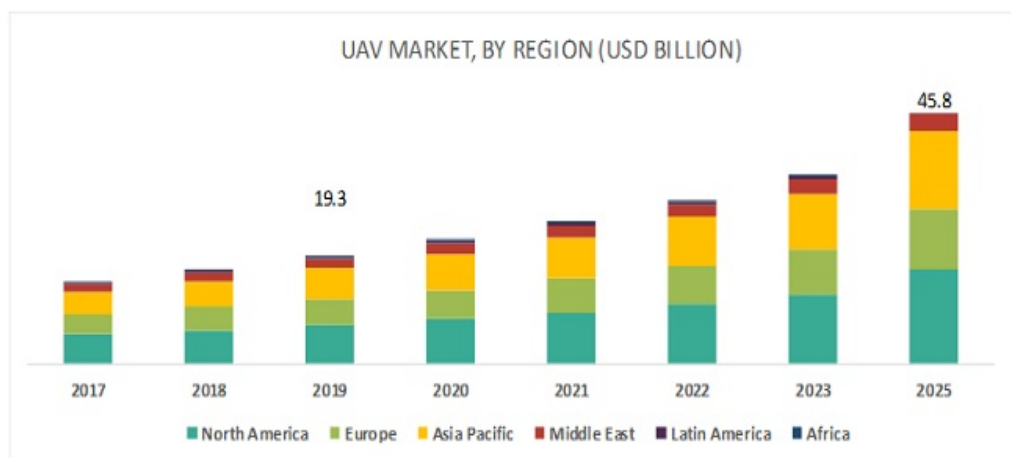


Fig. 1. UAV market by macro-regions of the world [1]

Ukraine ranks 27th in the world by the variety of UAV models, but domestic production is only 7 % of the total quantity. At the same time, almost 90 % of all UAVs are purchased in China, the United States and Israel. Today, the undisputed market leader is the Chinese company DJI, which owns more than 70 % of the global consumer market and more than 80 % of the Ukrainian market [2].

UAV safety is one of the most important tasks that require reliable solutions, given the active use of UAVs in business and in everyday life. The introduction of advanced information technologies into the industry plays a significant role in its development. According to the Strategic Plan for the Development of Air Transport in Ukraine, the priorities include ensuring the safe operation of UAVs, as well as the implementation and supervision of compliance with the Aviation Rules of Ukraine for the operation of UAVs. One of the components of supervision is the registration and storage of information about the owner, place and date of purchase, the serial number of the device etc.

An increase in the number of UAVs of different types in the airspace will inevitably lead to its overflow. It is necessary to apply fundamentally new approaches to UAV monitoring to prevent accidents that could lead to aircraft crashes and further casualties. One of the possible options is constant tracking of UAV movements in the air, though an important disadvantage of this approach is the significant energy costs for constant determination and transmission of coordinates. A promising way to solve this shortcoming is the use of 5G cellular networks, the functional features of which are suitable for use in UAVs.

FORMULATION OF THE PROBLEM AND RESEARCH OBJECTIVES

The airspace of Ukraine is defined and established by the standards of the international organization ICAO, the documents of the international organization Eurocontrol, the Regulations on the Usage of Airspace of Ukraine and the Air code of Ukraine [3]. Permission and conditions for the use of airspace are issued by the bodies of the joint civil-military system of air traffic control based on an application for the use of airspace, excluding cases as provided by the Air Code of Ukraine.

UAVs present a wide range of hazards for the civil aviation system [4] and these hazards must be identified and eliminated [5]. All ICAO member countries must comply with the relevant laws authorizing the usage of European airspace and establishing the conditions for its use by the civil-military air traffic control system based on applications for the use of airspace. According to the ICAO Chicago Convention [6], all UAVs, regardless of whether they are remotely manned, fully autonomous or mixed, are subjected to the provision of Article 8, which concerns obtaining a special service release. According to Article 31, each UAV must have an airworthiness certificate.

Among the various favorable technologies for the registration and monitoring of UAVs, wireless communication is important and has attracted considerable attention in recent years [7]. Indeed, many studies around the world are now exploring the possibilities for servicing commercial UAVs with cellular networks. Manufacturers of cellular networks are testing prototypes of unmanned base stations (UBSs), while research institutions are studying and developing mathematical and algorithmic solutions to solve new problems that arise with the development of UBSs. In [8] similar developments and their influence on the integration of UAVs into the cellular network

are analyzed. Proceedings [9–11] are devoted to the analysis of wireless technologies, new opportunities and challenges of these technologies when using communications with UAVs; in [12–13] the improvement of the fourth-generation cellular networks (LTE) was carried out to increase the efficiency of UAV operation; in [14] an overview of unresolved problems in UAV communications is carried out.

To optimize existing and build new wireless remote registration and UAV monitoring systems with 4G and 5G cellular networks, it is necessary to develop methods that will improve the performance of cellular communication networks so that they can meet the necessary criteria in urban conditions. It is also necessary to ensure the introduction of new and support for existing mobile systems that should meet the requirements of modern network architecture, create effective traffic management tools and ensure a sustainable service quality indicator.

Communication is one of the key issues in creating a UAV monitoring system. The fastest possible transmission of information with minimal delay and high reliability of data delivery are required. That is why universal coverage of modern cellular networks should be carried out in Ukraine to properly support radio access technologies. Under these conditions, 5G cellular communication technologies can significantly improve the quality of the main criteria required for UAV monitoring.

The purpose of the paper is to analyze the state of the UAV market and related legislation in the world and Ukraine; to develop the technology for intelligent control of UAV monitoring using cellular networks; to prepare guidelines for the implementation and application of the system.

UAV MONITORING SYSTEM ARCHITECTURE

The monitoring of objects is usually defined as the systematic accumulation and processing of information about the state and dynamics of changes in the parameters of the analyzed object or process, and the presentation of results in a form convenient for the supervisor. Monitoring systems combine hardware and software, and wired or wireless data transmission technologies are used for their interaction. Observing dynamic objects, such as UAVs, is quite a challenge, especially outside densely populated areas, as the transmission of information about the condition and location of the aircraft can be difficult. With the provision of sufficient coverage of the territory by cellular networks of the fourth and higher generations, the problem of data transmission is minimized.

In general, the monitoring system using cellular networks consists of a monitoring center, supervisory control and data acquisition system (SCADA), base stations (BS) of cellular networks and UAV networks (Fig. 2). The main monitoring center contains a separate data processing center (DC), which receives information, and means for presenting information to monitoring operators. SCADA performs data acquisition and analysis in real-time or in time close to it. Information is processed as it is received and, most importantly, it is aggregated from all levels and sources. Data transmission is performed through cellular networks. BS *gNB* (Next Generation Node B) provides coverage and wireless data transmission. To communicate with *gNB* stations, UAVs must be equipped with appropriate transmitters that support 5G cellular network standards.

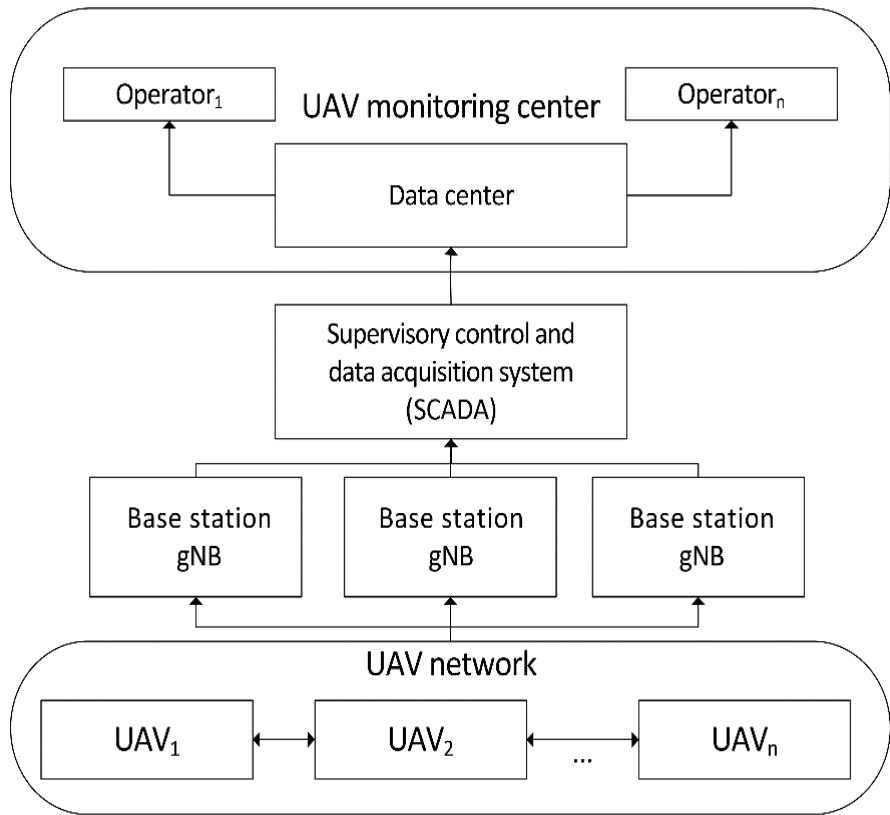


Fig. 2. Implementation scheme of UAVs' monitoring system using cellular networks

The monitoring system analyses UAV's position and detects violations of the airspace, unsafe head-on approaches and other scenarios of aircrafts unauthorized usage. Counteracting to the occurrence and, if possible, liquidation of the infringement consequences includes the continuous monitoring of potentially dangerous locations and objects to take necessary actions towards consequences liquidation; taking necessary actions for fighting with possible violations consequences; fast response on infringements with the help of aircraft; the formation of the possible swift actions, their dispatching, synchronization and maneuvering of resources of the control dynamics [15, 16].

The concept of a developed method of monitoring and responding to the infringements in the UAV network is based on the following steps (Fig. 4):

1. An event E_1, \dots, E_f of a certain type occurs. It could be an accidental (V_1, \dots, V_g) or purposeful violation (IV_1, \dots, IV_e).
2. Information regarding events are transmitted on specialized allocated BS *gNB*.
3. Base stations compare received information with respective templates, conditions and areas of airspace. Afterwards information regarding purposeful violation IV_1, \dots, IV_e is transmitted to SCADA (Fig. 3).

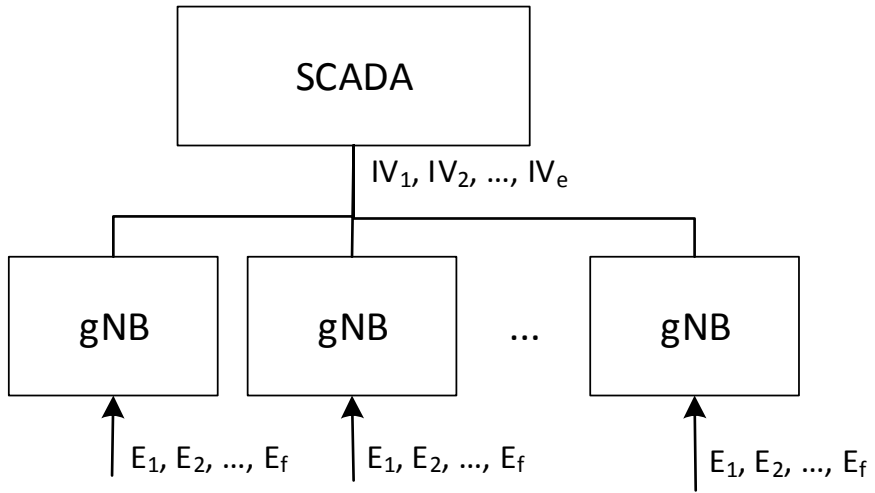


Fig. 3. Transfer of information about events into BS and SCADA

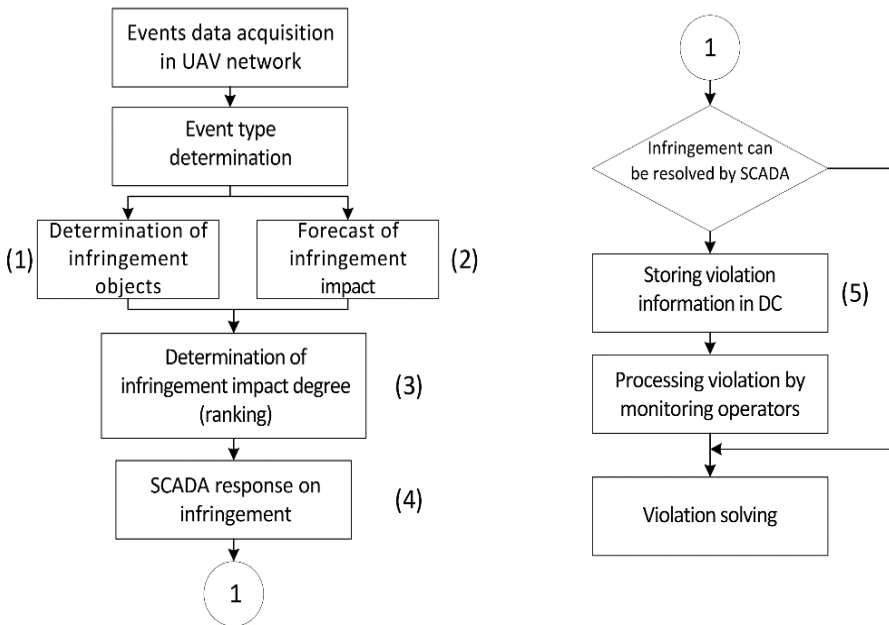


Fig. 4. Algorithm of the proposed monitoring method

4. Based on a set of rules for responding to the infringement SCADA decides on how it is necessary to react.

5. After processing the violation, SCADA exchanges information with the UAV monitoring center, where information regarding violation IV_1, \dots, IV_e is stored in DC and is given to the monitoring operators.

gNB base stations collect data about every event in the UAV network, caused by both purposeful IV_1, \dots, IV_e , as well as accidental IV_1, \dots, IV_g actions. Infringement premeditation is defined by a comparison of the event parameters with the respective templates.

After this simultaneously the set of objects o , which are possibly affected by the infringement (block 1)

$$O = \{ac = 1adO_{ac}\} = \{O_1, O_2, \dots, O_{ad}\}, (ac = \overline{1, ad})$$

is being defined, and the set of extrapolation rules (block 2)

$$R = \{ab = 1agR_{ab}\} = \{R_1, R_2, \dots, R_{ag}\}, (ab = \overline{1, ag})$$

is being formed, which allows estimating the potential influence of infringement on airspace objects.

Determination of the influence degree of infringement (block 3) is conducted by the formula:

$$IL_{bd} = \frac{Q_{bc}}{\sum_{bi=1}^{bc} Q_{bc}}, bi = \overline{1, bc},$$

where Q_{bc} is the comparative importance coefficient, which is calculated by the formula:

$$Q_{bc} = \sum_{bi=1}^{bc} a_{bi} \cdot x_{bibj}, bi = \overline{1, bc},$$

where x_{bibj} is the value of bi -th criteria of violation type bj ; a_{bi} is the importance of the bi -th criteria.

SCADA system response on the infringement is carried out according to the set of rules (block 4)

$$L = \{i = 1nL_i\} = \{L_1, L_2, \dots, L_n\}.$$

In the case when SCADA is capable to positively resolve the violation, it sends the necessary commands back to the violator and stores the respective information in DC. In the other case, when SCADA is unable to resolve the violation, it sends information to DC and monitoring operators. After a successful response to the infringement, its information is stored and the set of such infringements (block 5)

$$I = \{ia = 1naI_{ia}\} = \{I_1, I_2, \dots, I_{na}\}$$

is formed.

IMPLEMENTATION AND APPLICATION OF THE SYSTEM

In the absence of UAV built-in cellular communications, it is necessary to develop a specialized device for the implementation of the proposed system. Such a device must be universal and capable of connecting to any type of UAV. Size variability will be a significant problem when developing a device, but for most models, a universal solution is possible, and mini- and micro-drones will require separate equipment or software reprogramming.

For registration, the buyer must confirm his identity with a passport or other relevant documents. After getting acquainted with the conditions of UAV use and the country's legislation on airspace, the first stage of registration takes place. The second stage occurs during the first activation of the UAV. When buying a UAV in official stores, the seller will be required to register the buyer and create an entry in the register of the Monitoring Center for the purchased device. The record will contain information about the passport data of the buyer and the place of purchase. At the first activation of the UAV, the software and/or hardware of the developed system is started.

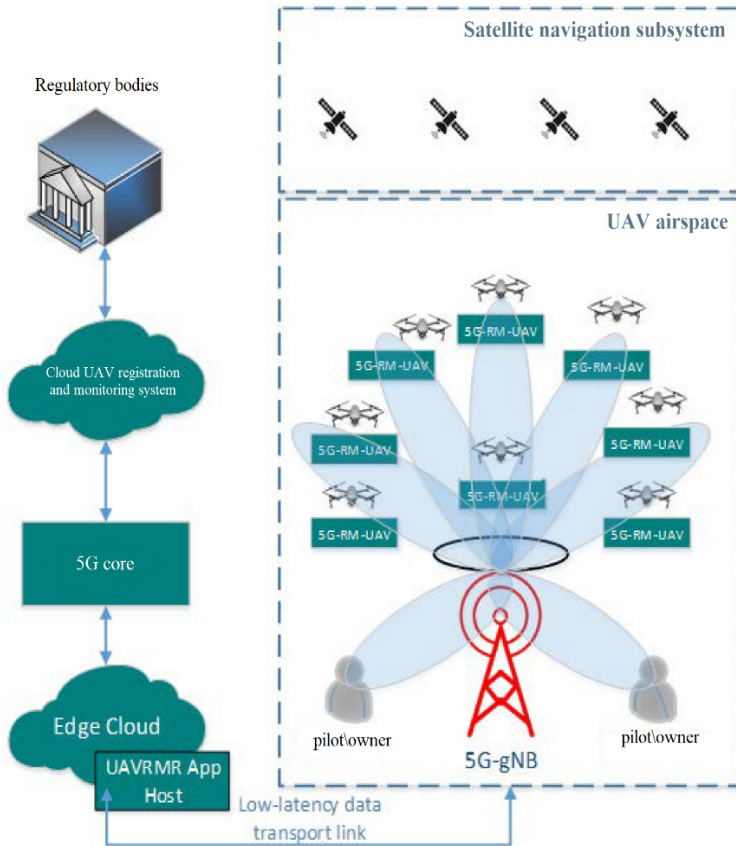


Fig. 5. Implementation of the UAV monitoring and registration center with compliance to the 5G network architecture

It sends a signal to the primary server that contains the UAV serial number (IMEI), the date and place of activation, and additional telemetry information. On the server-side, the information for each UAV is combined based on a unique serial number and stored during the operation of the device. If the owner has disconnected the registration and monitoring device himself, he must be held responsible following the adopted legislation.

According to the model of the monitoring system (Fig. 5), the UAV sends the signal to the BS, where it is immediately sent to the local SCADA center, and from there to the UAV monitoring center, where they are analyzed and stored.

The monitoring and recording device sends a signal with a frequency of 5 s, which is a sufficient interval for tracking UAVs during the flight. During the full flight, the device consumes 1000 times less charge than the average battery charge, i.e. the flight time is reduced by 0.1 %, which can be neglected. However, much more effective from a software and hardware point of view would be the development of a monitoring and registration system integrated into the on-board equipment of the UAV.

If a violation occurs, the UAV sends a normal signal, which is distinguished as a violation directly in the BS and then, if necessary, is transmitted to the DC for storage. After the detection and registration of the infringement, the aftercoming actions depend on the internal regulations of the country. Among the possible options, there are a fine, a seizure of UAVs, calling of law enforcement officers.

CONCLUSIONS

The work is devoted to solving the problem of UAV monitoring and registration. The provisions of the documents on unmanned aerial vehicles were considered and it was concluded that in these documents the issue of registration and monitoring is in the initial stages of its solution, there is no clear and unanimous vision of a potential solution to the problem. As shown in the paper, if this problem is not solved, then UAVs can be used for criminal purposes and cause damage to people or property.

Therefore, in order to solve this problem, the possibility of using a new generation of cellular networks to ensure the registration and continuous monitoring of UAVs was considered. As a result, a modern 5G cellular network was chosen for the development of the communication system. This network has a high data rate with ultra-low latency and is the most advanced of all existing alternatives. The paper also proposed new technology for intelligent control of UAV monitoring, which consists of a monitoring center, a data processing center and the supervisory control and data acquisition system. The use of cellular base stations speeds up the processing of events in the UAV network with the help of filtering. The proposed monitoring system can provide the highest level of safety when using UAVs.

The results of the work can be used by civil aviation regulators to monitor the use of airspace by unmanned aerial vehicles, as well as to prevent casualties and emergencies.

REFERENCES

1. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Market — Global Forecast to 2025 — MarketsandMarkets, October 2019, p. 322.
2. “Overview of the areas of UAVs' use in everyday life” URL: <http://www.50northspatial.org/ua/uavs-everyday-life/> (Last accessed: 13.10.2020) (in Ukrainian).
3. “Drones and Ukrainian legislation” URL: <http://www.50northspatial.org/ua/drony-ta-ukrayinske-zakonodavstvo/> (Last accessed: 13.10.2020) (in Ukrainian).
4. ICAO Cir 328, Unmanned Aircraft Systems (UAS), p. 54 URL: https://www.icao.int/meetings/uas/documents/circular%20328_en.pdf (Last accessed: 13.10.2020)
5. Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS), ICAO Doc 10019 1st Edition, p. 166 URL: <https://store.icao.int/en/manual-on-remotely-piloted-aircraft-systems-rpas-doc-10019>. (Last accessed: 13.10.2020)
6. Convention on International Civil Aviation. Ninth Edition. [ebook] Chicago: International Civil Aviation Organization, p. 114 URL: http://www.icao.int/publications/Documents/7300_orig.
7. Zeng, Q. Wu and R. Zhang, “Accessing From the Sky: A Tutorial on UAV Communications for 5G and Beyond”. Proceedings of the IEEE, vol. 107, no. 12, pp. 2327–2375, Dec. 2019
8. A. Fotouhi, H. Qiang, M. Ding, M. Hassan, L. Galati Giordano, A. Garcia-Rodriguez, and J. Yuan “IEEE Survey on UAV Cellular Communications: Practical Aspects, Standardization Advancements, Regulation, and Security Challenges”. *Journal of communications surveys and tutorials*. 2019, pp 1–28
9. M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, Y.-H. Nam, and M. Debbah. “A Tutorial on UAVs for Wireless Networks: Applications, Challenges, and Open Problems”. ArXiv e-prints, Mar 2018 – arXiv:1803.00680
10. S. Hayat, E. Yanmaz, and R. Muzaffar. “Survey on Unmanned Aerial Vehicle Networks for Civil Applications: A Communications Viewpoint”. *IEEE Communications Surveys Tutorials*. 18(4), Fourthquarter 2016, pp.2624–2661.
11. Y. Zeng, R. Zhang, and T. Joon Lim. “Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges”. *IEEE Communications Magazine*. 54(5), 2016, pp. 36–42.
12. NTT DOCOMO Inc., Ericsson. New SID on enhanced support for aerial vehicles. 3GPP RP-170779 RAN#75, Mar. 2017. URL: <https://portal.3gpp.org/ngppapp/CreateTDoc.aspx?mode=view&contributionUid=RP-170779>. (Last accessed: 13.10.2020)
13. 3GPP Technical Document RP 181644. Summary for WI Enhanced LTE Support for Aerial Vehicles. Sept. 2018. URL: https://www.3gpp.org/ftp/TSG_RAN/TSG_RAN/TSGR_81/Docs/RP-181644.zip. (Last accessed: 13.10.2020)
14. L. Gupta, R. Jain, and G. Vaszkun. “Survey of Important Issues in UAV Communication Networks”. *IEEE Communications Surveys Tutorials*. 18(2) Secondquarter 2016, pp. 1123–1152.
15. Hu Zhengbing, V. Gnatyuk, V. Sydorenko, R. Odarchenko, and S. Gnatyuk. “Method for cyberincidents network-centric monitoring in critical information infrastructure”. *International Journal of Computer Network and Information Security*. 9, no. 6, 2017, pp. 30–43
16. R. Odarchenko, P. Usik, O. Volkov, V. Simakhin, O. Gospodarchuk and Y. Burmak “5G Networks Cyberincidents Monitoring System for Drone Communications”. 2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD) Kyiv, Ukraine, October 22–24, 2019, pp. 165–169.

Received 10.09.2020

ЛІТЕРАТУРА

1. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Market — Global Forecast to 2025 — MarketsandMarkets, October 2019, p. 322
2. “Огляд сфер використання БПЛА в повсякденному житті”. 2016. URL: <http://www.50northspatial.org/ua/uavs-everyday-life/> (Дата звернення: 13.10.2020 р).

3. Дрони та українське законодавство». 2016. URL: <http://www.50northspatial.org/ua/drony-ta-ukrayinske-zakonodavstvo/> (Дата звернення: 13.10.2020 р).
4. ICAO Cir 328, Unmanned Aircraft Systems (UAS), p. 54. 2011. URL: https://www.icao.int/meetings/uas/documents/circular%20328_en.pdf (Дата звернення: 13.10.2020 р).
5. Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS), ICAO Doc 10019 1st Edition, p. 166. 2015. URL: <https://store.icao.int/en/manual-on-remotely-piloted-aircraft-systems-rpas-doc-10019> (Дата звернення 13.10.2020 р).
6. Convention on International Civil Aviation. Ninth Edition. [ebook] Chicago: International Civil Aviation Organization, p. 114 [Електронний ресурс]. — 2006. — Режим доступу: http://www.icao.int/publications/Documents/7300_orig.pdf (дата звернення 13.10.2020 р). — Назва екрану.
7. Zeng, Q. Wu and R. Zhang, “Accessing From the Sky: A Tutorial on UAV Communications for 5G and Beyond”. Proceedings of the IEEE, vol. 107, no. 12, pp. 2327–2375, Dec. 2019
8. A. Fotouhi, H. Qiang, M. Ding, M. Hassan, L. Galati Giordano, A. Garcia-Rodriguez, and J. Yuan “IEEE Survey on UAV Cellular Communications: Practical Aspects, Standardization Advancements, Regulation, and Security Challenges”. Journal of communications surveys and tutorials 2019, pp 1–28.
9. M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, Y.-H. Nam, and M. Debbah. “A Tutorial on UAVs for Wireless Networks: Applications, Challenges, and Open Problems”. ArXiv e-prints, Mar 2018 – arXiv:1803.00680
10. S. Hayat, E. Yanmaz, and R. Muzaffar. “Survey on Unmanned Aerial Vehicle Networks for Civil Applications: A Communications Viewpoint”. IEEE Communications Surveys Tutorials, 18(4), Fourthquarter 2016, pp.2624–2661.
11. Y. Zeng, R. Zhang, and T. Joon Lim. “Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges”. IEEE Communications Magazine, 54(5), 2016, pp. 36–42.
12. NTT DOCOMO Inc., Ericsson. New SID on enhanced support for aerial vehicles. 3GPP RP-170779 RAN#75. 2017. URL: <https://portal.3gpp.org/ngppapp/CreateTDoc.aspx?mode=view&contributionUId=RP-170779> (Дата звернення 13.10.2020 р).
13. 3GPP Technical Document RP 181644. Summary for WI Enhanced LTE Support for Aerial Vehicles. 2018. URL: https://www.3gpp.org/ftp/TSG_RAN/TSG_RAN/TSGR_81/Docs/RP-181644.zip (Дата звернення 13.10.2020 р).
14. L. Gupta, R. Jain, and G. Vaszkun. “Survey of Important Issues in UAV Communication Networks”. IEEE Communications Surveys Tutorials, 18(2) Secondquarter 2016, pp. 1123–1152.
15. Hu Zhengbing, V. Gnatyuk, V. Sydorenko, R. Odarchenko, and S. Gnatyuk. “Method for cyberincidents network-centric monitoring in critical information infrastructure”. International Journal of Computer Network and Information Security 9, no. 6, 2017, pp. 30–43.
16. R. Odarchenko, P. Usik, O. Volkov, V. Simakhin, O. Gospodarchuk and Y. Burmak “5G Networks Cyberincidents Monitoring System for Drone Communications”. 2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD) Kyiv, Ukraine, October 22–24, 2019, pp. 165–169.

Отримано 10.09.2020

Одарченко Р.С., д-р техн. наук, доцент

провід. наук. співроб. відд. інтелектуального управління,

e-mail: odarchenko.r.s@ukr.net

ORCID: 0000-0002-7130-1375

Волков О.Є.,

зав. відд. інтелектуального управління

e-mail: alexvolk@ukr.net

ORCID: 0000-0002-5418-6723

Сімахін В.М., аспірант,

молодш. наук. співроб. відд. інтелектуального управління

e-mail: thevladsima@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4497-0925

Семенов Р.В., аспірант,

молодш. наук. співроб. відд. інтелектуального управління

e-mail: ruslansemenog20@gmail.com

ORCID: 0000-0002-6714-0644

Господарчук О.Ю.,

старш. наук. співроб. відд. інтелектуального управління

e-mail: dep185@irtc.org.ua

ORCID: 0000-0001-6619-2277

Міжнародний науково-навчальний центр

інформаційних технологій

та систем НАН та МОН України,

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

ТЕХНОЛОГІЯ 40, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ МОНІТОРИНГОМ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ У ПОВІТРЯНОМУ ПРОСТОРІ З ВИКОРИСТАННЯМ СТІЛЬНИКОВИХ МЕРЕЖ 5G

Вступ. Зростання кількості безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у повітряному просторі, а також недосконалість нормативно-правової бази щодо регулювання їхньої діяльності, ставить численні завдання перед регуляторами. В роботі пропонується розроблення інтелектуальних технологій та програмно-апаратних систем у поєднанні з надсучасними стільниковими мережами 5G для розв'язання завдань реєстрації та моніторингу БПЛА.

Мета статті — проаналізувати стан ринку БПЛА та пов'язаного законодавства у світі та Україні, розробити технологію інтелектуального керування моніторингом БПЛА з використанням стільникових мереж, підготувати вказівки щодо імплементації та застосування системи.

Методи. В роботі використано методи передачі даних у мережах 5G і побудови глобальних розподілених мереж інтернету речей для реалізації технології моніторингу, методи аналізу даних та виявлення аномалій для дослідження подій, що виникають у мережі БПЛА.

Результати. З метою розв'язання проблеми моніторингу та реєстрації БПЛА проаналізовано можливість використання стільникових мереж нового покоління для забезпечення реєстрації та безперервного моніторингу БПЛА. Як результат, для розвитку системи зв'язку було вибрано сучасну стільникову мережу 5G, яка є найбільш прогресивною серед усіх сучасних альтернатив.

Розроблено технологію інтелектуального моніторингу БПЛА з використанням сучасної стільникової мережі 5G. Використання мережі п'ятого покоління надає високу швидкість передачі даних з наднизькою затримкою та задовольняє всім необхідним вимогам безпеки. Технологія інтелектуального керування моніторингом БПЛА складається з окремих методів, які виконуються в центрі моніторингу, центрі оброблення даних та в системі диспетчерського керування та збору даних. Використання базових станцій стільникових мереж для первинного оброблення та фільтрації даних пришиває оброблення подій у мережі БПЛА.

Висновки. Використання базових станцій стільникових мереж пришвидшує оброблення подій у мережі БПЛА шляхом фільтрації. Запропонована система моніторингу може забезпечити найвищий рівень безпеки у разі використання БПЛА.

Результати роботи можуть бути використані регуляторними органами у галузі цивільної авіації з метою контролю за використанням повітряного простору безпілотними апаратами, а також для запобігання виникненню нештатних та аварійних ситуацій.

Ключові слова: *інформаційна технологія, система моніторингу, система реєстрації, безпілотний літальний апарат, мережа 5G.*

Medical and Biological Cybernetics

DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt202.04.057>

UDC 517+519.2]:[57+61

ANTOMONOV M.Yu., DSc (Biology), Professor,
Chief Researcher, the Department of Epidemiological
Research and Medical Informatics,
mail: antomonov@gmail.com
A.M. Marzeev Institute of Public Health
of National Academy of Medical Sciences of Ukraine,
50, Popudrenko str., 02660, Kyiv, Ukraine

IMITATION OF COMPENSATOR AND ADAPTIVE PROCESSES IN BIOSYSTEMS

Introduction. *The functioning efficiency of any biosystem (BS), regardless of its hierarchy level, depends on its adapt ability to changes in the environment or its state. Adaptive processes are implemented at the molecular, subcellular, cellular, tissue, organ, systemic and organismal levels. This adaptation can occur with the help of various mechanisms, has different dynamic characteristics, be accompanied by different energy costs and be more or less efficient. In this regard, it is expedient to identify as accurately as possible the type of adaptive process and assess its stressfulness for BS. In our opinion, such a classification can be carried out by formal markers of adaptive processes (by graphs) using mathematical methods of their description.*

The purpose of the paper is to develop a formalized classification of adaptive processes types based on mathematical modeling of their dynamics.

Methods: structural and functional modeling using the approaches and mathematical apparatus of the theory of automatic control, using differential equations, probabilistic approaches and graphical analysis.

Results. *The structurally functional model of the adaptive process is presented as three connected subsystems. The output process of the first subsystem is described by an exponential function with a constraint, of the second — a logistic (S-shaped) function, of the third — their difference, i.e. unimodal curve. The operation of such a system is considered for different ratios of the parameters of the transfer functions of the subsystems (conversion factors and time constants). It is proposed to use the output function of this system as an identifier of various types of adaptive reactions: adaptation, compensation, reparative regeneration and a pathological process. Criteria for definition of such a distinction are proposed using integral and dynamic characteristics of mathematical models.*

Conclusions. *The proposed three-block diagram of the adaptive process makes it possible to perform its mathematical description in the simplest and most adequate form. Based on*

the paradigm of one-to-one correspondence of the structure and function of the adaptive process, it is possible to calculate the parameters of the subsystems involved in organizing the systemic response in response to external influences using the actually recorded graphs of these adaptive processes: their conversion coefficients and time constant. The systemic representation of the biosystem work gives us the probabilistically represent the participation process of the constituent subsystems when an external influence changes (evolutionary transformations). The developed criterion system allows, according to the graphs of the dynamics of the output function of a real biomedical research, to determine the type of adaptive process, that is, to correlate it with specific biological mechanisms and to assess the degree of its "pathology" for the biosystem.

Keywords: *information technology, system approach, structural and functional modeling, approaches to the theory of automatic control, differential equations, probabilistic methods, graphic analysis.*

INTRODUCTION

The functioning efficiency of any biosystem (BS), regardless of the level of the hierarchy, depends on its ability to adapt to changes in the environment or its state. Adaptive processes are implemented at the molecular, subcellular, cellular, tissue, organ, systemic and organismal levels. This adaptation can take place with the help of various mechanisms, have different dynamic characteristics, be accompanied by different energy costs and be more or less efficient.

In biomedical terminology, which is most fully represented in pathological physiology, the whole complex of adaptive reactions is called adaptive or compensatory-adaptive processes. The history of their formulation and clarification of differences in mechanisms lasts more than a century [1–4]. Currently, pathological physiology distinguishes some stages: activation of the biosystems functioning, relatively stable compensation and energy exhaustion (decompensation) [5]. Accordingly, in terms of severity (manifestation/ intensity), the processes are referred to as physiological adaptation, restorative (reparative) regeneration and pathological regeneration. Pathological manifestations can manifest themselves in various pathological processes: atrophy, hypertrophy, organization and rearrangement of tissues; metaplasia, etc. [6].

Consequently, based on the system concepts of the organization and functioning of the BS, we can say, that it is clear that processes can occur either with small changes, during which the BS "independently" adapts to the changed conditions of existence, or is forced to use mechanisms of interaction with other biosystems to use their resources in order to compensate for violations of its functioning.

In fact, we are talking about the distinction between relatively natural and acceptable for the body reactions from relatively "pathological" and much less acceptable for the body response to external influences. In this regard, it is obvious that it is expedient to identify the type of adaptive process as accurately as possible and assess its stressoriness for BS.

To our mind, such a classification can be performed according to the formal markers of the dynamics of adaptive processes using mathematical methods of their description.

The purpose of the paper is to develop a formalized classification of various types of adaptive processes in biosystems based on mathematical modeling of their dynamics.

RESEARCH METHODS

As the main method for the formalized description of adaptive processes, we will use structural and functional modeling using the approaches and mathematical apparatus of the automatic regulation theory [7, 8].

In this case, we are guided by the basic postulate that any biological adaptive process can be characterized by a certain output function and a certain structure. Accordingly, its description can occur at the structural, functional or structural-functional level [9, 10, 11].

As a rule, in the course of biosystem adaptive reactions, certain structural changes occur. The number of actively working subsystems changes, connections between them are broken or formed, redundant elements are connecting or overloaded (faulty) elements stop working etc. All these structural changes, of course, manifest themselves in a system output function change.

The mutual influence and connection between the structure and function of the system seems to be so rigid that it makes it possible to unambiguously link changes in the function of the system with changes in its structure. That is, an adaptive change in the structure entails a change in function, a change in function indicates a change in structure. Consequently, the structure of the BS within this approach can be judged by its function.

STRUCTURAL AND FUNCTIONAL MODEL OF THE BIOSYSTEM ADAPTIVE RESPONSE TO EXTERNAL IMPACT

Let us consider the simplest structural-functional model of the adaptive response of some BS in response to the action of some harmful environmental factor.

We will use the following assumptions.

1. Homeostatic functioning of any BS presupposes the existence of oppositely directed processes in it, capable of both increasing the values of the functioning indicators and decreasing them.

2. To organize an adaptive response in each BS, it is necessary to assume the presence of, at least, three subsystems that implement the mechanisms of perception, regulation and transmission of a signal outside the BS.

3. The final adaptive response of the integral BS is the result of the interaction of these three subsystems.

Thus, the structure of the studied bioprocess should be presented in the form of, at least, three blocks. Moreover, the most adequate structure that meets the formulated conditions is the block diagram shown in Fig. 1.

In Fig. 1, the used notation is traditional for the theory of automatic control. Namely, W is the transfer function (operator of transformation "input — output"), p is Laplace operator ($p = d/dt$).

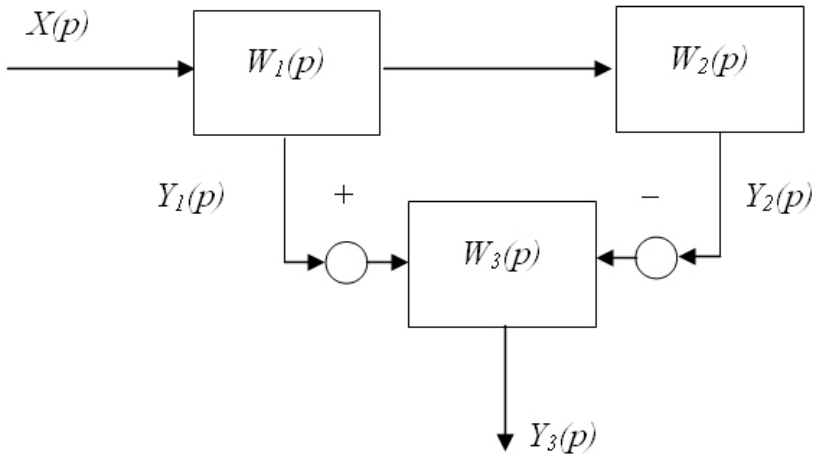


Fig. 1. Block diagram of a ring connection of three subsystems

Let us further assume that the first and second blocks are inertial links, and the third is just an adder with a certain transformation coefficient k_3 , to which the signal from the first block arrives with the “+” sign, and from the second one — with the “-” sign. Then the transfer functions of these blocks will be written as follows:

$$W_1(p) = \frac{Y_1(p)}{X(p)} = \left(\frac{k_1}{T_1 p + 1} \right),$$

$$W_2(p) = \frac{Y_2(p)}{Y_1(p)} = \left(\frac{k_2}{T_2 p + 1} \right);$$

$$W_3(p) = \frac{Y_3(p)}{Y_1(p) - Y_2(p)} = k_3,$$

where k_1, k_2, k_3 are conversion factors (amplification or attenuation) of signals arriving at the corresponding blocks, T_1, T_2 — time constants of the first two blocks.

Passing from the operator representation to the corresponding differential equations, we obtain the system:

$$T_1 \frac{dy_1}{dt} + y_1 = k_1 x;$$

$$T_1 T_2 \frac{d^2 y_2}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{dy_2}{dt} + y_2 = k_1 k_2 x;$$

$$y_3 = k_3 (y_1 - y_2),$$

where x denotes an input signal (action).

The solution to the system of equations is the following functions:

$$y_1(t) = k_1 x \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}} \right);$$

$$y_2 = k_1 k_2 x \left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_2}} \right).$$

Therefore, the representation of the output function of the entire system will be written as follows:

$$y_3 = k_3 x \left[k_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}} \right) - k_1 k_2 \left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_2}} \right) \right] =$$

$$k_1 k_3 x \left[(1 - k_2) + e^{-\frac{t}{T_1}} \left(\frac{T_2 - T_1 (1 - k_2)}{T_1 - T_2} \right) - e^{-\frac{t}{T_2}} \left(\frac{k_2 T_2}{T_1 - T_2} \right) \right].$$

Graphs of all three functions are shown in Fig. 2.

Let's consider in detail the functions of these subsystems (blocks).

The first block is under the influenced and plays a barrier protective role. In it, biotransformation (with a coefficient k_1) of the input signal (x) takes place into a form adequate "for perception" by the entire system. Signal transmission into the biosystem occurs with some inertia (determined by the time constant T_1), which is a characteristic of any biological process. The coefficient of transmission (conversion) has a value determined by the strength of the action (x) of the external signal and the capabilities of this subsystem. If the input signal is constant, the output function from this block is an exponent (y_1 in Fig. 2) with an asymptote $k_1 x$.

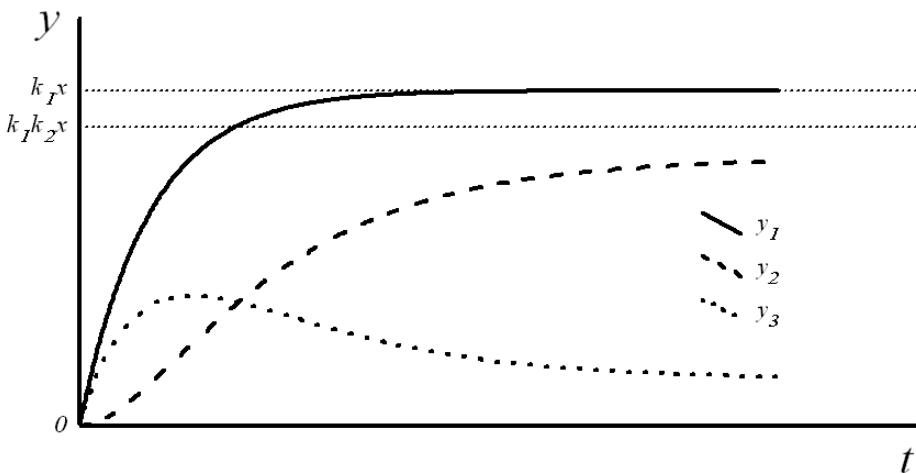


Fig. 2. Output functions of the three-block structure links

Thus, since the input of the second block receives not a constant, but an exponentially increasing signal from the first block, the inertial processes of the second block lead to an even greater "pulling" of the signal (y_2 in Fig. 2) and the transformation of its output function into an S -shaped form (logistic function) with an asymptote determined by the coefficients of both blocks and the influence force ($k_1 k_2 x$).

At the third, output block, mutual analysis and comparison of signals from the first and second blocks takes place. Since they have different directions, they are subtracted in the third block. In addition, on this block, the signal is amplified (or attenuated) with a coefficient k_3 and is converted from codes "understandable" inside the BS to "outer codes".

All the regulatory mechanisms that implement the actual adaptive process are combined by us in the second subsystem (block). The impact indirectly coming on the third block through the first block seeks to bring its function beyond normal homeostatic oscillations. External influence reaches the second block also indirectly through the first block. In order for the second block to realize its adaptive task, the signal that is generated on it must come to the summing third block with a sign opposite to the signal from the first block. However, since second block signal lags behind the function of the first block, in the third block changes firstly develop until the opposition from the second block arrives.

If the signal gain in the second block is small compared to the gain of the first block ($k_2 < k_1$), this opposition can simply slow down the growth of the system output function or transfer it to a stable stationary phase (y_1 in Fig. 3).

If the gain on the second block is close to the gain on the first block, then the signal from the second block will inertially "extinguish" the first signal, and the deviations of the resulting function from the initial state begin to decrease until the system returns to initial state completely (y_2 in Fig. 3).

If $k_2 > k_1$, then the protective forces are "stronger" than the influence. The limiting stationary position of the output function can go into the negative half-plane, and changes in the function of the entire system will acquire a sign opposite to the initial changes (y_3 in Fig. 3). All these curves can be considered typical expressions of the adaptive process.

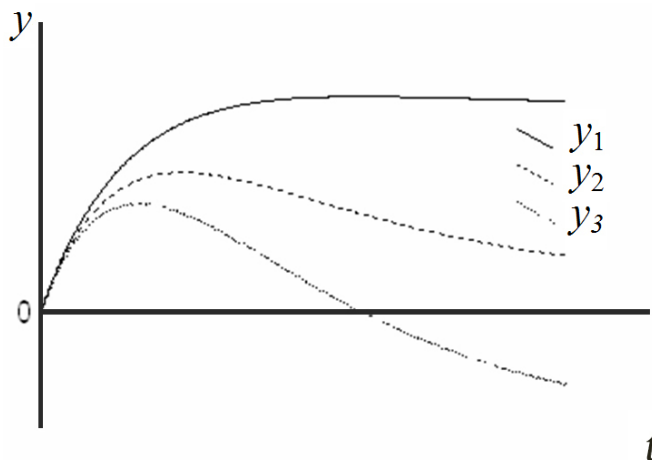


Fig. 3. Function of the adaptive process at different intensity of "resistance" to the influence: y_1 if $k_2 < k_1$; y_2 if $k_2 = k_1$; y_3 if $k_2 > k_1$

Or, on the contrary, proceeding from the paradigm of the structure and function relationship adopted by us, if an unimodal curve of the dynamics of the output function of the studied biosystem is observed in biomedical studies of adaptive processes, then it can be considered that this process decompose into two components: an exponential and an *S*-shaped function. Moreover, the exponential function reflects the negative changes initiated by the impact, and the *S*-shaped function has the opposite sign and characterizes the antagonistically directed compensatory-adaptive processes.

The corresponding structural and functional model of the process can be represented in the form of three blocks shown in Fig. 1.

Taking these provisions, one can admit the possibility of solving the so-called inverse problem. Namely, according to the initial data obtained as a result of a specific biomedical study and reflected in the form of an unimodal curve (y_3 in Fig. 2), it is possible to calculate the specific parameters of the output function. Since this function includes the parameters of all three blocks (k_1, k_2, k_3, T_1, T_2), the characteristics of the constituent functions (y_1 and y_2) can also be considered definite.

From them you can get information about the operation of the first and second subsystems, i.e. subsystems, information from which was not or could not recorded directly during the study. For example, you can calculate the time constants T_1 and T_2 and get information about the "persistence" of the corresponding subsystems.

By putting real biological prototypes in correspondence with all three blocks, it is possible to evaluate the qualitative and quantitative characteristics of biosystems involved in the formation of an adaptive response.

PROBABILISTIC DYNAMIC MECHANISM OF ADAPTATION TO EXTERNAL IMPACT

In the process of adaptation of the biosystem to changing external influences, they undergo successively a number of structural rearrangements. Each subsequent stage occurs, firstly, after the possibilities of the previous one begin to be exhausted, and, secondly, it is accompanied by large energy costs.

The probability or degree of participation of elements and subsystems in the work of a biosystem in the absence of impact can be characterized by a certain distribution function. Let us assume that this spatial distribution of subsystems obeys a normal law. Then the probability density curve of the participation of subsystems in the work of the biosystem (their activity) in the norm can be represented in the form of a bell of normal distribution (Fig. 4a).

The process of adaptation to the impact begins with the mobilization of those elements that, although they belong to the considered biosystem, but the probability of their participation in its work in a normal state (without impact) is rather small. As a result of the connection of these subsystems, the range of the biosystem reaction norm is expanded, its ability to function normally under changed external conditions increases.

The change in the nature of the distribution that occurs as a result of the backup subsystems connection is shown in Fig. 4b. The bell of the normal distribution gets wider, the variance increases. The biosystem becomes capable of functioning normally in a wider range of external conditions.

The next stage of adaptive rearrangements within a biosystem is characterized by the withdrawal from work of those elements whose work does not lead to facilitating the system functioning. Graphically, it is expressed by the appearance of some asymmetry in the distribution curve (Fig. 4c).

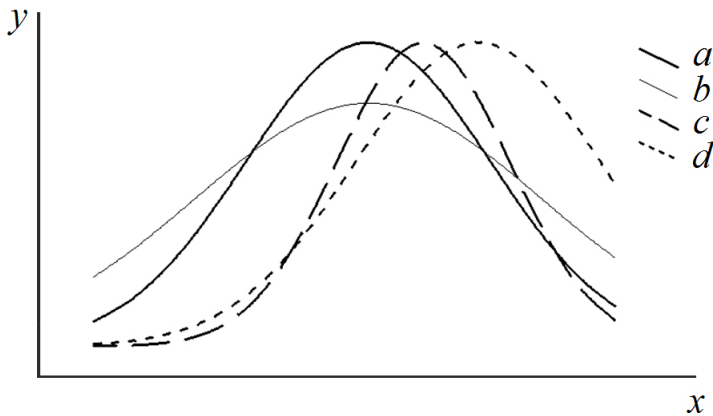


Fig. 4. Change in the distribution of the subsystems participation with an increase in external influence

A further change in the nature of the distribution with increasing influence, apparently, is expressed by the displacement of the distribution curve along the abscissa in the direction of increasing influence (Fig. 4d). Under the influence of the factor, there is a change in the use of certain subsystems by the biosystem. The greatest weight, the greatest probability of participation is acquired by those subsystems, the connection of which contributes to the normal functioning of the BS in the changed conditions. There is, as it was, a natural selection of the elements (subsystems) most beneficial for BS.

An example of such a structural reorganization taking place in real biosystems is intraorgan compensation of kidney nephrons in nephrosclerosis: nephrons that survived the destruction increase their function and hypertrophy. Similar structural and functional rearrangements occur after surgical removal of the upper half of the small intestine, when the secretion of the stomach and pancreas first increases (Fig. 4b), and then their compensatory hypertrophy develops (Fig. 4c).

TYPES OF ADAPTIVE PROCESSES

The nature of the BS's response to an external impact is determined both by the characteristics of the impact (the number and nature of the factors, their intensity, mode and duration of action) and the reaction of the biosystem itself (the number of subsystems reacting to this impact, their initial state, the specificity of the action of a factor or their combination on reacting systems etc.).

The term "adaptation" is often used as a synonym for adaptive responses in medicine and biology. Sometimes the concept of adaptation is identified with the concept of protection, accommodation, sensitization, resistance, evolutionary adaptability, functional mobility, changes in sensitivity etc.

If the possibility of the presence of different types of adaptive reactions is allowed (assumed), then the concept of "adaptation" in medicine and biology is often used as a synonym for the most "painless" adaptive process. In medicine, the concept of "decompensation" is used for processes that are "more pathological" in nature and are associated with a disease state. In toxicology in chronic intoxication, it is customary to distinguish between four stages of responsive adaptive processes occurring in the body, which successively replace one an-

other with increasing exposure time: primary decompensation, physiological adaptation, compensated pathological process, decompensated pathology. In physiology, it is possible to differentiate adaptive processes into "norm", adaptation, compensation, reparative regeneration, "pathology".

However, no matter how many types of adaptive processes are divided and no matter how they are called, the criteria for their differentiation are very vague, rather subjective and do not have a quantitative expression.

In the further presentation, we will assume that the biosystem can react to the action of various factors with a whole range of adaptive reactions, of which at the moment it demonstrates only one. We will also assume that the following types of distinguishable and identifiable adaptive reactions are possible (in ascending order of the degree of damaging effect): 1) normal homeostatic changes, or simply "norm", 2) physiological adaptation, or simply "adaptation," 3) compensation, 4) repair (regeneration), 5) pathological (irreversible) changes, or simply "pathology".

DEPENDENCE OF THE ADAPTIVE PROCESS TYPE ON THE BIOSYSTEMS HIERARCHY LEVEL

Let us consider a hypothetical sequence of connecting hierarchically different structural formations in the implementation of an adaptive reaction. For simplicity, we will use only three levels of the hierarchy: BS — subsystem — element. It is natural to assume that with the same magnitude of the damaging effect, the degree of dysfunction of the system will be directly related to the level of its organization. So, with small influences, the elements function is first of all disrupted. With an increase in the active factor force, disturbances arise at the subsystems level, which, with a further increase in the factor influence, leads to disturbances in the functioning of the BS itself.

The intensity of the adaptive process directly depends on the impact level and is commensurate with the magnitude of the violations occurring. Therefore, at a constant magnitude of the impact, the lower the organization level of the reacting structure, the more pathological its adaptive reaction is, and vice versa, the higher the level of organization, the less manifestation of the reaction.

Table 1. Possible relationship between the type of adaptive process and the biosystem hierarchy level under various input influences

Impact intensity (in convent. units)	Hierarchy level		
	Element	Subsystem	Biosystem
0	norm	norm	norm
1	adaptation	norm	norm
2	compensation	adaptation	norm
3	pathology	compensation	adaptation
3	death	pathology	compensation
4	death	death	pathology
5	death	death	death

Thus, the replacement of some elements by others in the course of the adaptive process is a process that is clearly compensatory in nature at the element level. However, at the subsystem level, this process can be characterized as adaptive. At the BS level, this change can manifest itself only in minor homeostatic fluctuations. Likewise, breakage of elements (i.e. their certain pathology) at the subsystems level can be regarded as a compensatory process, and at the level of the BS itself it can manifest itself as an insignificant adaptive deviation.

Consequently, we can assume that some correspondence of the hierarchy level of the system under consideration to the tension degree of the adaptive process taking place in it is fulfilled (Table 1).

This pattern reflects the evolutionarily developed relationship between the "security" of the system and the hierarchical level of its organization.

FUNCTIONAL CLASSIFICATION OF ADAPTIVE PROCESSES

As a rule, the experimental curves of the adaptive processes, subject to the obvious requirements for the experiments and their mathematical processing (selection of the body system most sensitive to this factor, the use of an integral indicator of system state, careful registration of the process etc.) with a sufficiently long exposure factors have the previously considered characteristic form of unimodal functions.

Let us consider an example of the introduction of formalized criteria according to the graphs "time/ effect" of the output functions of the BS ($y(t)$). As the main characteristics for distinguishing adaptive processes (adaptation, compensation, reparative regeneration and pathology), we will use the following indicators:

- 1) the ratio of the values of the function $y(t)$ with the limiting value of the reaction "norm" (the boundary of the "norm range" is $y_0(t)$),
- 2) the time of getting into the "norm range",
- 3) indicators of the "power" ("activity") of the process [12]. In this case, under the "norm range" we mean the range of homeostatic changes in the output function without external influence.

The consideration will be carried out for two periods of the study during the action of the factor ($t_0 < t < t_1$) and after the termination of its action (during the aftereffect ($t > t_1$)). In addition, for ease of classification, we will neglect the possible phasing of changes (the transition of the graph through the abscissa axis), and therefore we will consider these changes only in the positive half-plane.

By adaptation (physiological) we mean an adaptive process that is not accompanied by irreversible damage. That is, after a short-term deviation from the "extremely normal" value, the graph of the function returns to the "norm range" ($y < y_0$) during the period of exposure. During the aftereffect ($t > t_1$), the adaptation response does not differ from the control one, i.e. does not go beyond the boundaries of the "norm range" (Fig. 5).

The general view of the change in the BS output function during the compensatory process, in principle, can be of the same character as during adaptation. Under the action ($t_0 < t < t_1$), the output function leaves the "norm corridor" and returns to it until the action termination. During the aftereffect period ($t > t_1$), the function does not differ from the control one. Therefore, the distinction between adaptation and compensation in such a functional description should be introduced not on a qualitative but on a quantitative level.

For example, we can propose as a quantitative criterion a measure of the “intensity” (“activity”) of the process (S), which we will express through the area (integral) under the output function:

$$S = \int_{t_0}^{t_1} y(t) dt,$$

which indirectly reflects the expenses of biosystem energy resources. Integral of the "norm range" value $y_0(t)$:

$$S_0 = \int_{t_0}^{t_1} y_0(t) dt$$

characterizes the "extremely normal" homeostatic energy expenditure.

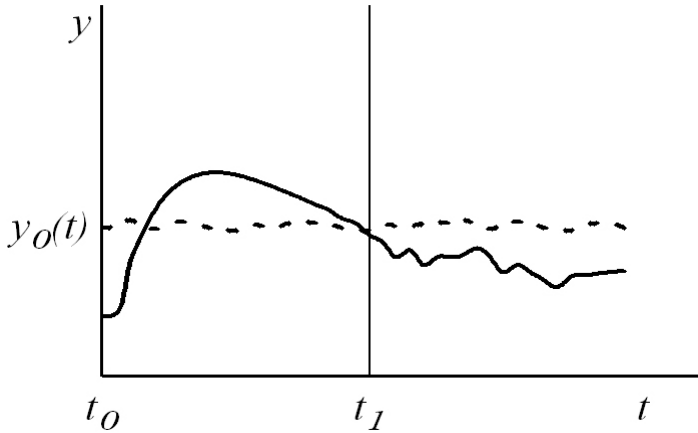


Fig. 5. Changes in the BS output function during the adaptation process

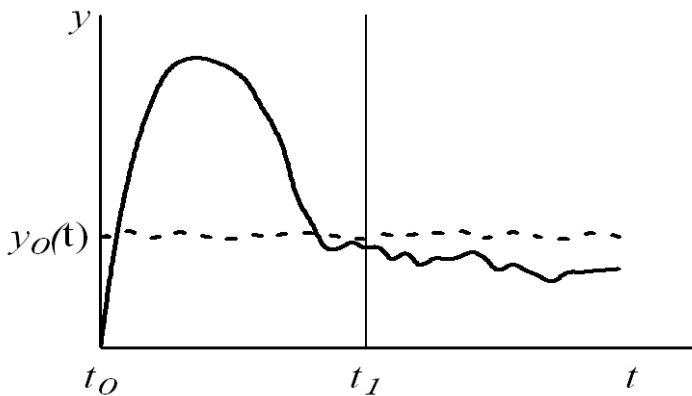


Fig. 6. Changes in the BS output function during the compensatory process

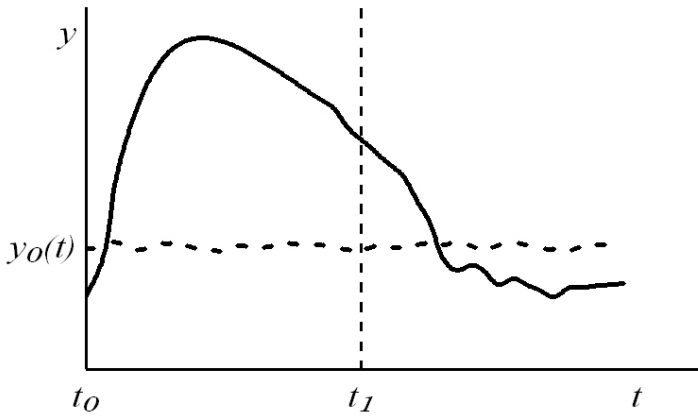


Fig. 7. Changes in the BS output function during reparative regeneration

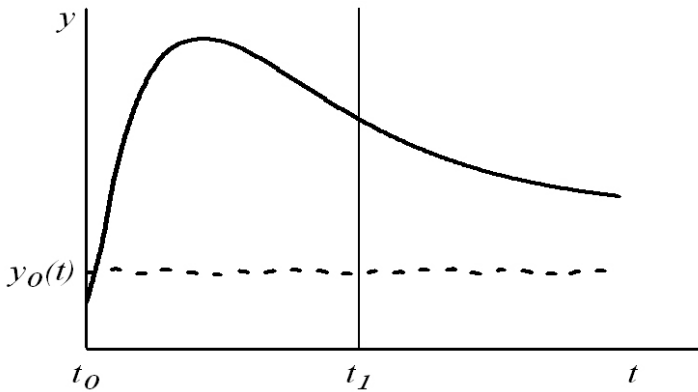


Fig. 8. Changes in the BS output function during the reaction "pathology"

If the value of the integral S is less than the area of the “norm range”, then the expenditure of resources of the biosystem is not excessive, if it is more, then such a waste of resources can lead to a certain pathology. Accordingly, at $S < S_0$, the response can be considered adaptive, at $S > S_0$ compensatory (Fig. 6).

The reparative regeneration reaction is an adaptive process of the next, “more pathological” level. Reparative regeneration is usually understood as a reaction in which changes in BS accumulated during the exposure period are eliminated during the recovery period. A possible graph of such dynamics is shown in Fig. 7.

During the exposure period, the function $y(t)$ leaves the “norm range” $y_0(t)$ and does not return to it during this entire period ($t_0 < t < t_1$). During restoration ($t > t_1$), the function enters the “norm range”: $y(t) < y_0(t)$.

With the reaction “pathology”, the function $y(t)$, having left the “norm range” during the period of exposure, does not return to it even during the recovery period. One of the possible behavior types of such a function is shown in Fig. 8.

Thus, by the type of the DS output function, the adaptive process can be attributed to one type or another according to perfectly clear, easily recorded and quantitatively measured characteristics.

The dependence of such a criterion distinction on two indicators is obvious: the exposure time and the boundaries of the “norm range”. In our opinion, both of these dependencies are completely justified.

With a short exposure time, the process can be regarded as rather "pathological", but over a longer time interval, the same time changes can be attributed to a much less "dangerous" type of adaptive processes. There can be no adaptation "in general", but there can be adaptation under a certain mode of exposure, and by changing this mode, it is possible to obtain compensation or pathology from the initial adaptation.

The limits of the "norm" are determined by the methodological capabilities of the study, and the wider they are, the less reliable the assessment can be. For example, the same curve of the graph of the output function with a "narrow range " (an accurate method for assessing the "norm") can be reliably attributed to the adaptation or compensatory process, while with a "wide range " it may not go beyond its limits, and the process cannot be considered as going beyond the limits of normal homeostatic oscillations.

WAVES OF PROBABILITY

With a sequential change in the magnitude of the external influence, the onset probability of different adaptive reactions for the same BS will change. It is logical to assume that with an increase in the impact, the onset probability of the "less pathological" reactions will decrease, and the probability of the onset of "more pathological" reactions will increase.

Hypothetically, the distribution of the probability (P) of the occurrence of different adaptive reactions, when the force of the external influence (x) changes, can occur in Fig. 9.

The probability of reaction "norm" occurrence (R_n), reflecting the BS normal state (Fig. 9a) is maximal at a certain value of the factor x_n that is optimal for the organism (if the factor has only a "harmful" effect $x_n = 0$). With a sequential increase (or decrease) of x relative to x_n , the probability of the "normal" reaction decreases, and the adaptation reaction probability (P_a) becomes more and more probable, which at $x = x_a$ reaches a maximum (Fig. 9b).

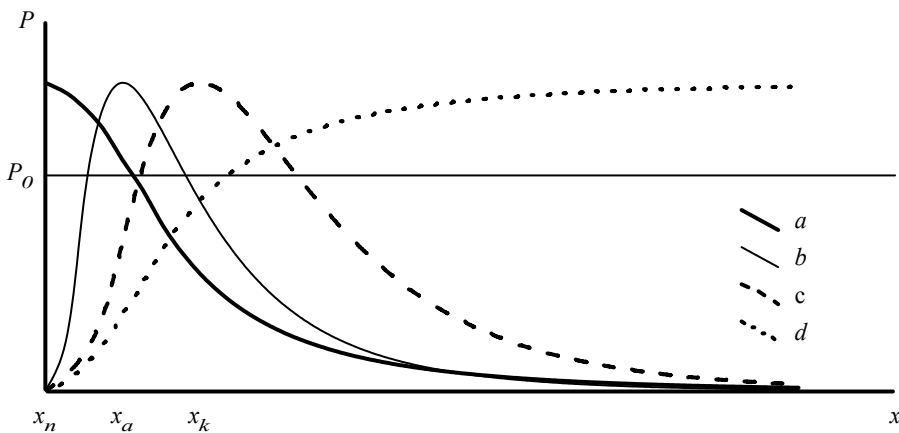


Fig. 9. Distribution of adaptive reactions when changing external influences

With an increase in the factor at $x > x_a$, the probability of the occurrence of adaptation P_a decreases, and a compensatory reaction (P_k) becomes more probable. After the maximum strength of P_k at $x = x_k$, the probability of a compensation reaction decreases. Similar processes occur with the probability of the reparative regeneration development. With an even greater increase in the level of exposure, this probability decreases, and the probability of irreversible pathological disorders (P_p) increases.

The threshold P_0 , with respect to which the probability of the adaptive processes occurrence are considered, is determined primarily by the method of detecting and differentiating the adaptive processes themselves. Its value has an essentially probabilistic nature. With a "good" method of differentiating processes, it is lower and "probability waves" have pronounced peaks. With a "bad" technique — the threshold is higher, and the "probability waves" themselves have more gentle maxima.

CONCLUSIONS

The proposed three-block diagram of the adaptive process allows us to present its structural and functional model in the simplest ("minimum necessary") form.

Based on the paradigm of one-to-one correspondence of the structure and function of the adaptive process, it is possible to calculate the parameters of the subsystems involved in organizing the systemic response using the actually recorded graphs of adaptive processes in response to external influences, namely their conversion coefficients and inertial properties.

The systemic representation of a biosystem functioning makes it possible to probabilistically represent the process of participation of the constituent subsystems when the external influence changes (evolutionary transformations).

The developed criterion system allows, according to the graphs of the output function dynamics of a real biomedical research, to determine the type of adaptive process, that is, to correlate it with specific biological mechanisms and to assess the degree of its "pathology" for the biosystem.

REFERENCES

1. Adaptation and compensation. The lancet, Volume 162, Issue 4188, 5 December 1903, Pages 1560–1566 [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(00\)99549-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(00)99549-7)
2. Physiological Mechanisms and Adaptation Strategies in Plants Under Changing Environment (Parvaiz A., Mohd R. W.) v. 1 Springer 2013, 386 pp. DOI 10.1007 / 978-1-4614-8591-9.
3. Physiological Mechanisms and Adaptation Strategies in Plants Under Changing Environment (Parvaiz A., Mohd R. W.) v. 2 2014, 394 pp. DOI: 10.1007 / 978-1-4614-8600-8
4. Bronwyn J., Martin W. D. Adaptation, Compensation, and Decompensation. Normal and Abnormal Swallowing pp 77–84 Springer 2020, 235 pp.
5. Pathological anatomy: textbook / AI Strukov, VV Serov. -6th ed., Ster. M.: Litterra, 2015. 880 p. (in Russian)
6. Davydovsky I.V. General human pathology. - 2nd ed., Rev. and add. M: "Medicine", 1969. 612 p. (in Russian).
7. Marchenko, AA, Guliy, VS Nastenkov DV Theory of automatic keruvannya. Pre-installation of automatic regulation systems. KPI im. Igor Sikorskogo, 2019, 31 p. (in Ukrainian)
8. Theory of automatic control: a textbook for universities. Lan, 2020, 219 p. (in Russian).

9. Encyclopedia of Cybernetics: in 2 volumes / ed. V.M. Glushkova. Kiev: Goal. ed. Ukrainian Radianske Encyclopedia, 1973, 570 p. (in Ukrainian)
10. Antonov M.Yu. Algorithmization of the choice of adequate mathematical methods in the analysis of biomedical data // Cybernetics and Computer Science. Kiev, 2007. Issue. 153. S. 12–23. (in Russian).
11. Antonov M.Yu. Methodology for the formation of complex indicators in environmental and hygienic research. // Hygiene and Sanitation. 1993, N7. p. 20–22. (in Russian).
12. Antonov M.Yu., Kozak LM Mathematical modeling of adaptation processes / Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference "Adaptive Opportunities of Children and Youth" September 10–11, 2020, Odessa, pp.6–9. (in Ukrainian)

Received 04.08.2020

ЛІТЕРАТУРА

1. Adaptation and compensation. The lancet, Volume 162, Issue 4188, 5 December 1903, Pages 1560-1566 [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(00\)99549-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(00)99549-7)
2. Physiological Mechanisms and Adaptation Strategies in Plants Under Changing Environment (Parvaiz A., Mohd R. W.) v.1 Springer 2013, 386 pp. DOI 10.1007/978-1-4614-8591-9.
3. Physiological Mechanisms and Adaptation Strategies in Plants Under Changing Environment (Parvaiz A., Mohd R. W.) v.2 2014, 394 pp. DOI: 10.1007/978-1-4614-8600-8
4. Bronwyn J., Martin W. D. Adaptation, Compensation, and Decompensation. Normal and Abnormal Swallowing pp 77–84 Springer 2020, 235 pp.
5. Патологическая анатомия: учебник / А. И. Струков, В. В. Серов. -6-е изд., стер. – М.: Литтерра, 2015. 880 с.: ил.
6. Давыдовский И.В. Общая патология человека. – 2-е изд., перераб. и доп. – М: «Медицина», 1969. 612 с.
7. Марченко А.А., Гулий В.С., Настенко Д.В. Теорія автоматичного керування. Дослідження системи автоматичного регулювання. КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019 – 31 с.
8. Теория автоматического управления: учебное пособие для вузов. Лань, 2020, 219 с.
9. Енциклопедія кібернетики : у 2 т. / за ред. В. М. Глушкова. — Київ : Гол. ред. Української радянської енциклопедії, 1973, 570 с.
10. Антонов М.Ю. Алгоритмизация выбора адекватных математических методов при анализе медико-биологических данных. *Кибернетика и вычислительная техника*. – Киев, 2007. – Вып. 153. – С. 12–23.
11. Антонов М.Ю. Методика формирования комплексных показателей в эколого-гигиенических исследованиях. //Гигиена и санитария. 1993, N7. с.20–22.
12. Антонов М.Ю., Козак Л.М. Математичне моделювання адаптаційних процесів / Збірник Наукових праць XIII міжнародної науково-практичної конференції «Адаптаційні можливості дітей та молоді», 10–11 вересня 2020 року, м. Одеса, с. 6–9.

Отримано 04.08.2020

Антомонов М. Ю., д-р біол. наук, проф.,
головн. наук. співроб. лаб. епідеміологічних досліджень
та медичної інформатики
e-mail: antomonov@gmail.com
ДУ «Інститут громадського здоров'я
ім А.М. Марзеєва НАМН України»,
50, вул. Попудренка, 02660, м. Київ, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ КОМПЕНСАТОРНО-ПРИСТОСУВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ У БІОСИСТЕМАХ

Вступ. Ефективність функціонування будь-якої біосистеми (БС), незалежно від рівня її ієрархії, залежить від її здатності адаптуватися до змін навколишнього середовища або її стану. Адаптивні процеси реалізуються на молекулярному, субклітинному, клітинному, тканинному, органному, системному рівнях та рівні цілісного організму. Ця адаптація може відбуватися за допомогою різних механізмів, мати різні динамічні характеристики, супроводжуватися різними енергетичними витратами і бути більш-менш ефективною. У зв'язку з цим доцільно якомога точніше визначити тип адаптаційного процесу та оцінити його стресогенність (патологічність) для БС. На наш погляд, таку класифікацію можна здійснювати формальними маркерами адаптивних процесів (за допомогою графіків) з використанням математичних методів їх опису.

Метою статті є розроблення формалізованої класифікації типів адаптивних процесів на основі математичного моделювання їхньої динаміки.

Методи: структурно-функціональне моделювання з використанням підходів та математичного апарату теорії автоматичного керування, з використанням диференціальних рівнянь, імовірнісних підходів та графічного аналізу.

Результати. Структурно-функціональну модель адаптивного процесу подано у вигляді трьох підсистем. Вихідний процес першої підсистеми описується експоненціальною функцією з обмеженням, другої - логістичною (*S*-подібною) функцією, третьої - їхньою різницею, тобто унімодальною кривою.

Роботу такої системи розглянуто для різних співвідношень параметрів передавальних функцій підсистем (коефіцієнтів перетворення та постійних часу). Вихідну функцію цієї системи запропоновано використовувати як ідентифікатор різних типів адаптаційних реакцій: адаптації, компенсації, репаративної регенерації та патологічного процесу. Встановлено критерії для визначення такого розділення з використанням інтегральних та динамічних характеристик математичних моделей.

Висновки. Запропонована трьохблочна схема адаптивного процесу дає змогу виконати його математичний опис у найпростішій та найадекватнішій формі. Виходячи з парадигми взаємозалежності структури та функції адаптивного процесу, можна розрахувати параметри підсистем, які беруть участь в організації системної реакції у відповідь на зовнішні впливи, використовуючи фактично записані графіки цих адаптивних процесів: їхні коефіцієнти перетворення та постійні часу. Системне подання функціонування біосистеми дає нам імовірнісне уявлення про процес участі складників підсистем, коли зовнішній вплив змінюється (еволюційні перетворення). Розроблена система критеріїв дає змогу за графіками динаміки вихідної функції реального біомедичного дослідження визначити тип адаптаційного процесу, тобто зіставити його з конкретними біологічними механізмами та оцінити ступінь його "патології" для біосистеми.

Ключові слова: інформаційні технології, системний підхід, структурно-функціональне моделювання, підходи до теорії автоматичного керування, диференціальні рівняння, імовірнісні методи, графічний аналіз.

DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt202.04.073>

УДК 004.942+519.7+612

ЛЯБАХ К.Г.¹, д-р біол. наук,
провід. наук. співроб. відд.
комплексних досліджень інформаційних технологій
e-mail: katya.e.g@gmail.com

ДУХНОВСЬКА К.К.²,
асистент кафедри прикладних інформаційних систем
Факультету інформаційних технологій
e-mail: duchnov@ukr.net

¹ Міжнародний науково-навчальний центр
інформаційних технологій та систем

НАН України та МОН України,
40, пр. Акад. Глушкова, 03187, м. Київ, Україна

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
60, вул. Володимирська, 01033, м. Київ, Україна

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИВЧЕННЯ КИСНЕВОГО РЕЖИМУ М'ЯЗОВОЇ КЛІТИНИ

***Вступ.** Останнім часом увагу наукової громади прикуто до розмаїття впливів мітохондрій на життєдіяльність клітини і всього організму. Мітохондрії розглядають як мішені у лікуванні стресу, нейро-дегенеративних захворювань, раку, ішемії – реперфузії і багатьох інших патологій.*

***Мета роботи** — створення зручної для користувача технології аналізу кисневого режиму клітини з гетерогенністю потужності мітохондрій всередині міоциту людини.*

***Методи.** На етапі математичного моделювання застосовано апарат механіки суцільних середовищ, диференційних рівнянь в часткових похідних. На етапі розроблення інформаційної технології кисневого режиму м'язової клітини людини використано чисельні методи, об'єктно-орієнтовану мову програмування C#, технологію ASP Core.*

***Результати.** За допомогою розробленої технології моделюється транспорт кисню в системі «кров — клітина — мітохондрії», задаються параметри кровотоку і киснево-транспортних властивостей крові, навантаження, геометрія капілярів досліджуваної клітини, а також нерівномірність розподілу мітохондрій, як споживачів кисню. Результати розрахунків різних режимів характеризують їх в цілому і в різних точках клітини, вони надаються користувачеві у вигляді таблиць, графіків і опису полів в матричній формі, їх легко зіставляти між собою на одному екрані.*

Відзначено важливість зв'язку між міжкапілярною відстанню і гетерогенністю потужності мітохондрій. Технологію розраховано на використання стандартного набору показників транспорту та утилізації O_2 для дослідження кисневого постачання активного скелетного м'яза людини.

***Висновки.** Інформаційна технологія дослідження кисневих режимів клітини (міоциту), розроблена на основі математичної моделі тривимірної дифузії кисню, надає*

© ЛЯБАХ К.Г., ДУХНОВСЬКА К.К., 2020

ISSN 2663-2586 (Online), ISSN 2663-2578 (Print). Сyb. and comp. eng. 2020. № 4 (202)

73

можливість розрахунку розподілу внутрішньоклітинних швидкостей споживання кисню, напруг кисню, їхніх середніх значень та області гіпоксії як множини відношення швидкості споживання кисню до значень кисневого запиту.

Ключові слова: інформаційна технологія, моделі транспорту та утилізації кисню у м'язі, кисневий режим, м'язова клітина, гіпоксія, гетерогенність мітохондрій, окислювальна потужність мітохондрій, міжкмілярна відстань, дифузія.

ВСТУП

Головна умова життя клітини — безперервне споживання енергії. Як відомо, запасання вільної енергії в молекулах АТФ забезпечується в основному аеробно, за рахунок внутрішньоклітинного дихання мітохондрій. Мітохондрії — це «енергетичний центр» клітини. Останні 10–15 років увагу наукової громадськості буквально прикуто до величезного розмаїття впливів мітохондрій на життєдіяльність клітини і всього організму, зростає число публікацій і наукових конференцій, присвячених новим даним про функції мітохондрій. Встановлено, що енергетичне постачання клітини визначає енергетичний потенціал організму, від якого безпосередньо залежить його здоров'я [1].

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Мітохондрії за своїм походженням є бактеріями, які зберегли властивість рухатися, використовуючи транспортні білки і ендоплазматичний ретикулум. Їх переміщення не обмежується внутрішньоклітинним середовищем. Виявлено, що клітини можуть обмінюватися мітохондріями для репарації ушкоджень. Такий обмін спостерігали між нейронами і астроцитами в легенях курців, в міокарді у разі стресу, в кістковій тканині. Здорові остеоцити передавали мітохондрії через дендритну мережу остеоцитам, які відчули стрес з нефункціональними мітохондріями. Донором мітохондрій служила здорова клітина, іноді стовбурова, реципієнтом — пошкоджена [2, 3]. Мітохондрії розглядають як мішені у лікуванні стресу, нейро-дегенеративних хвороб, раку, ішемії — реперфузії і багатьох інших патологій.

Цим пояснюється важливість вивчення внутрішньоклітинних умов, в яких працюють мітохондрії, а саме, умов постачання і споживання кисню. Ці умови в об'ємі клітини ми називаємо кисневим режимом клітини (КРК). Фундаментальна характеристика КРК — розподіл напруги кисню (pO_2) в її об'ємі, який залежить від доставки кисню кров'ю і його споживання мітохондріями в процесі дихання. Дихання мітохондрій супроводжується виділенням активних форм кисню (АФК), їх продукція збільшується як за високих, так і за низьких значеннях pO_2 клітини [1, 2]. До недавнього часу АФК, що порушують структури і функції клітини, розглядалися як неминуче зло окисного метаболізму. Однак зараз встановлено, що обмежений потік АФК є необхідним клітині як сигнал зворотного зв'язку під час адаптації до стресу, гіпоксії, аутофагії, клітинної диференціації, в імунній відповіді тощо [1, 3, 4]. Отже, КРК дає інформацію про швидкість споживання кисню VO_2 , що необхідно для аеробного запасання АТФ, і про розподіл кисню у клітині, від якого залежить продукція АФК, інформацію про глибину і протяжність зони гіпоксії. В такому аспекті будемо розглядати КРК та фактори, що його визначають.

У разі невідповідності доставки кисневого запиту виникає зниження тканинного pO_2 за критичний рівень. Такі зниження у вигляді гіпоксичних ділянок можуть дуже розрізнятися і різним чином впливати на показники КРК. Очевидно, важливі не тільки середні значення pO_2 і VO_2 , а й їхній розподіл у клітині. Тому ядром технології вибрано модель дифузійного транспорту O_2 з розподіленими параметрами. Експериментально встановлено, що мітохондрії у реальній клітині, як правило, рухаються, зливаються (фьюжен) і розходяться (фіжен). У разі гіпоксії їхні переміщення до судини і/або до областей з найбільшим кисневим запитом превалює над рухом у зворотному напрямку. Відзначено їхні скупчення поблизу судин і в області високої метаболічної активності [4–8]. Отже, нерівномірність розподілу мітохондрій у клітині — експериментально встановлений факт.

Припускаючи, що нерівномірний розподіл мітохондрій в клітині має впливати на формування КРК, ми спрямували створення інформаційної технології на визначення КРК з різним розподілом мітохондрій для аналізу транспорту і споживання O_2 в системі «кров — клітина — мітохондрія» скелетного м'яза, що уможливить зіставлення та аналіз різних КРК, оцінювання ефективності шляхів мінімізації внутрішньоклітинних областей гіпоксії.

Мета роботи — створення зручної для користувача інформаційної технології аналізу кисневого режиму клітини з гетерогенністю потужності мітохондрій всередині міоциту людини.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ КИСНЕВОГО РЕЖИМУ КЛІТИНИ

Запропоновану технологію можна назвати новою, хоча основна модель дифузії O_2 , на яку ми спираємося, використовується давно. Перші моделі для розрахунку pO_2 описували радіальну дифузійну O_2 з капіляра в центрі кола до периферії. З введенням кровопостачання з'явилися об'ємні моделі, що включають нових учасників транспорту O_2 : кровоток, властивості крові, кінетику споживання O_2 , оксид азоту, міоглобін і [9–10] ін. I, нарешті, можливість досліджувати вплив розташування мітохондрій на кисневий режим була використана в [1, 8] і в ряді наших робіт [10–13]. Обсяг інформації про мітохондрії стрімко зростає, отже, фронт робіт по моделюванню повинен розширюватися. Ми пропонуємо технологію, що дає змогу працювати з різними внутрішньоклітинними розподілами мітохондрій, порівнювати їх між собою, а також розглядати адаптацію клітини до нових умов.

Математична модель для дослідження КРК описує тривимірну дифузійну O_2 з капілярів у клітину і споживання O_2 мітохондріями клітини, схематично задану у вигляді призми, оточеної ідентичними структурами з зазначенням у цій структурі тканин, капілярів, зон нормоксії, гіпоксії та аноксії (Рис. 1).

Модель враховує об'ємну (F) і лінійну (v) м'язового кровотоку, міжкапілярну відстань icd , розміри і взаємне розташування відкритих капілярів, питому кисневую потужність мітохондрій ($mrr(x, y, z)$), кисневую ємність крові (CaO_{2max}), вміст кисню в артеріальній крові (CaO_2), положення і форму кривої дисоціації оксигемоглобіну, коефіцієнти дифузії (α) і розчинності кисню у крові і тканині, а також уявну константу Міхаеліса для кисню (Km).

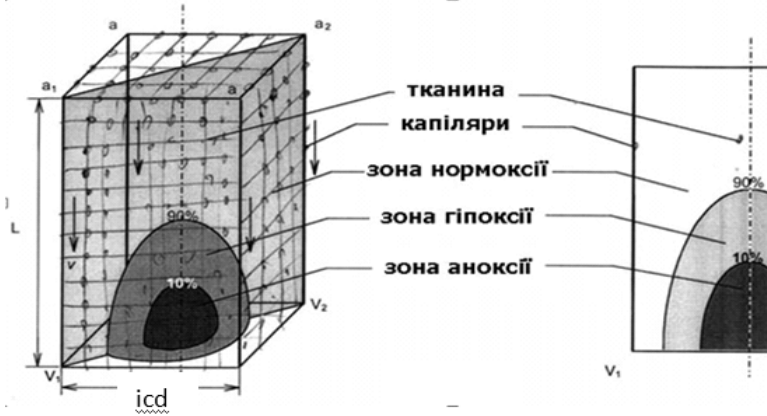


Рис. 1. Апроксимація міоцита в моделі — призма з зоною гіпоксії і аноксії (праворуч — половина симетричної картини зон постачання киснем у заштрихованому перетині) [14]

В обчислювальних експериментах у кожній розрахунковій точці клітини-міоцита визначаються напруга кисню (pO_2), швидкість споживання кисню (VO_2), їхні середні значення: pO_2t , VO_2C , артеріо-венозну відмінність концентрацій O_2 в крові (avd) і характеристики зони гіпоксії, а саме співвідношення

$$r = VO_2C / mrr_{\text{середнє}} \quad (1)$$

та

$$r(x, y, z) = VO_2(x, y, z) / mrr(x, y, z).$$

Детальний опис використаних математичних моделей транспорту та утилізації кисню у м'язовому волокні наведено в [10, 14].

У моделі необхідно врахувати кисневий запит клітини-міоциту (mrr). Якщо позначити максимальну швидкість споживання однієї мітохондрії як MRm , а кількість мітохондрій в елементарному об'ємі як n , отримаємо можливу питому кисневу потужність мітохондрій:

$$mrr(x, y, z) = MRm \cdot n.$$

Щоб відобразити у моделі нерівномірний розподіл мітохондрій або у загальному випадку нерівномірний розподіл питомої кисневої потужності (mrr) у клітині, задамо множину коефіцієнтів $R(x, y, z)$, відповідних нерівномірностей, що нас цікавлять. Отримуємо множину нерівномірно розподілених питомих потужностей:

$$mrr(x, y, z) = mrr \cdot R(x, y, z).$$

Рівняння дифузії-споживання O_2 з довільно розподіленими мітохондріями у міоциті має вигляд

$$\frac{\partial^2 pO_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 pO_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 pO_2}{\partial z^2} = \frac{mrr}{a \cdot D} f(pO_2) \cdot R(x, y, z), \quad (2)$$

де $R(x, y, z)$ — функція розподілу потужності мітохондрій в клітині; $f(pO_2) = pO_2(x, y, z) / (pO_2(x, y, z) + K_m)$; $f(pO_2)$ — тип кінетики зв'язування O_2 .

Споживання кисню розраховували за формулою:

$$VO_2(x, y, z) = F(pO_2) \bullet mrr(x, y, z)$$

Отже, для визначення кисневого режиму клітини міоциту потрібно вирішити крайову задачу (2) з початковим розподілом потужностей мітохондрій в цій клітині.

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ КИСНЕВОГО РЕЖИМУ КЛІТИНИ

На основі крайової задачі (2) було побудовано інформаційну технологію дослідження кисневого режиму клітини, яка забезпечує аналіз кисневого режиму клітини з різним розподілом споживачів кисню — мітохондрій (Рис. 2).

Технологія *MuscleController* складається з трьох блоків (Рис 3). На кожному блоці розв'язується крайова задача (2) і розраховується швидкість споживання кисню, розподіл кисню у клітині, розподіл напруги кисню у капілярі, в артеріальній і веноній крові тощо.

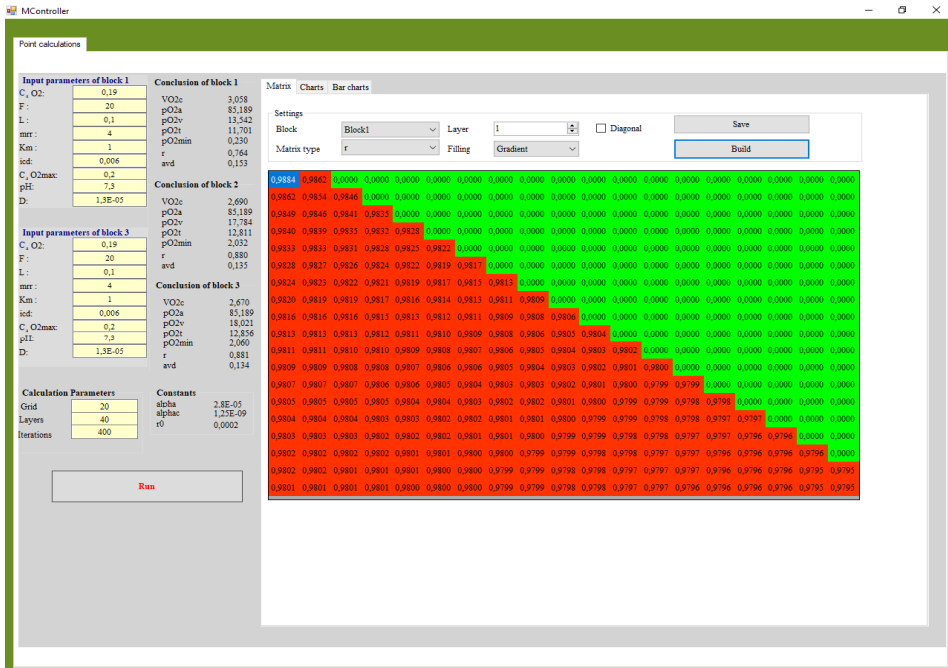


Рис. 2. Інтерфейс технології *MuscleController*

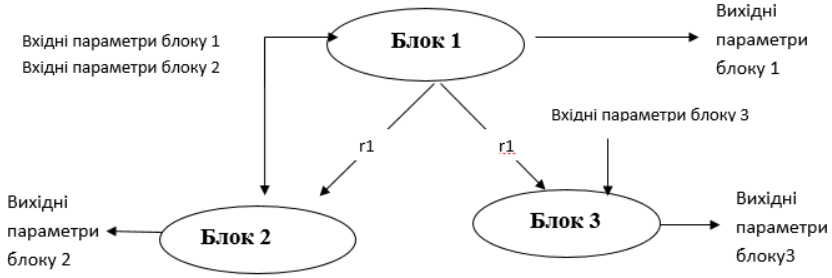


Рис. 3. Принципова схема технології

Input parameters of block 1		Conclusion of block 1	
$C_a O_2$:	0,19	VO_2c	3,058
F :	20	pO_2a	85,189
L :	0,1	pO_2v	13,542
mrr :	4	pO_2t	11,701
Km :	1	pO_2min	0,230
icd :	0,006	r	0,764
$C_a O_2max$:	0,2	avd	0,153
pH :	7,3		
D :	1,3E-05		

Рис. 4. Вхідні і вихідні параметри для блоку 1

Метою блоку 1 є розв'язання крайової задачі (2) у разі рівномірного розподілу потужностей мітохондрій за заданими параметрами доставки і споживання кисню (Рис. 4). Для цього у вхідне діалогове вікно блоку 1 потрібно ввести: точкові значення концентрації кисню в артеріальній крові (CaO_2), об'ємної швидкості кровотоку (F), довжину м'язової клітини (L), максимальну швидкість споживання кисню (mrr), константу Міхаеліса (Km), міжкапілярну відстань (icd), кисневу ємність крові (CaO_2max), середнє значення водневого показника крові (pH), а також коефіцієнт дифузії кисню в тканині (D). На виході буде отримано наступні показники кисневого режиму клітини міоциту: мінімальне напруження кисню в тканині (pO_2min), pO_2 в артеріальній та венозній крові (pO_2a , pO_2v), артеріо-венозна відмінність за концентрацією кисню (avd), середнє значення напруження кисню у тканині (pO_2t), середня швидкості споживання кисню (VO_2c) і розрахункова характеристика зони гіпоксії (1).

Обчислення, що були розраховані у блоці 1, стають вхідними даними для блоку 2 (Рис. 5). На виході блоку 2 отримується ті ж самі показники кисневого режиму клітини міоциту, але вже не у разі рівномірного розподілу потужностей мітохондрій, а за розрахованим у блоці 1 розподілом.

Conclusion of block 2	
VO _{2c}	2,690
pO _{2a}	85,189
pO _{2v}	17,784
pO _{2t}	12,811
pO _{2min}	2,032
r	0,880
avd	0,135

Рис. 5. Вихідні параметри блоку 2

Input parameters of block 3		Conclusion of block 3	
C _a O ₂ :	0,19	VO _{2c}	2,670
F :	20	pO _{2a}	85,189
L :	0,1	pO _{2v}	18,021
mrr :	4	pO _{2t}	12,856
Km :	1	pO _{2min}	2,060
icd:	0,006	r	0,881
C _a O ₂ max:	0,2	avd	0,134
pH:	7,3		
D:	1,3E-05		

Рис. 6. Вхідні і вихідні параметри для блоку 3

Calculation Parameters	
Grid	20
Layers	40
Iterations	400

Рис. 7. Налаштування розрахунків КРК

У блоці 3 розв'язується крайова задача (2) з урахуванням розподілу потужності мітохондрій, що також розраховується у блоці 1, але за заданими параметрами доставки і споживання кисню (Рис.6.).

Внаслідок цього на виході інформаційної технології *MuscleController* ми отримуємо такі дані: розподіл швидкостей споживання кисню (VO_2), напруг (pO_2), їхні середні значення тощо. Технологією передбачено можливість візуалізації характеристик кисневого режиму клітини: побудова матриць розподілу, графіків та гістограм.

Крайова задача (2) розв'язується за допомогою чисельного метода кінцевих різниць. В технології *MuscleController* впроваджено можливість налаштування сітки для інтегрування, кількості ітерацій та кількості шарів.

Технологія дає змогу вирішувати пряму і зворотну задачу. Пряма задача передбачає розрахунок pO_2 і VO_2 за заданими параметрами доставки і споживання O_2 при рівномірному розподілі потужності мітохондрій (mr). Для її вирішення використовується блок 1.

Зворотна задача передбачає за відомими показниками або тим, які ми можемо розрахувати, підбирати значення параметрів, які важко або неможливо поміряти, що відносяться до мітохондрій і мікроциркуляторного русла, при яких досягається потрібна швидкість споживання кисню. Сформульована нами зворотна задача з'явилася як наслідок ідеї, згідно з якою збільшення максимальної потужності мітохондрій дозволяє регулювати КРК при гіпоксії різної етіології. Вирішуючи зворотну задачу, вибираємо розподіл мітохондрій при гіпоксії і визначаємо як він змінить КРК, зокрема, зменшить гіпоксію, чи вплине на швидкість споживання кисню. Для розв'язання оберненої задачі були розроблені блоки 2 і 3, що працюють спільно з блоком 1.

Використання блоку 2 з розподілом мітохондріальних потужностей за градієнтом pO_2 , сформованому в блоці 1, показало, що у разі гіпоксичної гіпоксії «цілеспрямований» розподіл mr істотно покращує КРК. Так, у разі зниження концентрації кисню в артеріальній крові розподіл потужностей мітохондрій дав змогу підтримувати швидкість споживання кисню (VO_2c) постійною, зменшити або повністю знешкодити гіпоксію [6]. Те саме підтвердилося у дослідженні циркуляторної гіпоксії. Можливості такої адаптації залежали від інших параметрів доставки і енергетичних витрат клітини [9–11].

Блок 3, як і блок 2, також призначено для дослідження регуляції КРК за участю перерозподілу мітохондрій. Особливість полягає в тому, що за допомогою блоку 1 розраховувалися параметри КРК в режимі гіпоксії без переміщення мітохондрій. Потім інформація про градієнти напруги кисню і швидкостей його споживання передавалася в блок 3, а мітохондрії перебудовувалися в залежності від цієї інформації, при цьому можливість змінювати їхню потужність mr зберігалася, після чого розраховувалися параметри нового досліджуваного режиму, в тому числі питома окислювальна потужність мітохондрій, розподілену в просторі клітини пропорційно градієнтам pO_2 (блоку 1) з її максимальним значенням mr . Підкреслимо, що у блоці 3 може бути задано будь-які параметри режиму, незалежні від заданих у блоці 1. Далі за допомогою блоку 3 отримували характеристики нового КРК із заданим нерівномірним розподілом кисневого запиту.

АРХІТЕКТУРА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

Інформаційну технологію *MuscleController* розроблено об'єктно-орієнтованою мовою C# в середовищі *Visual Studio 2019*. Технологія має компонентну архітектуру і складається з чотирьох проектів, а саме: *EngineClasses*, *MuscleController*, *Testing*, *UserControlsLibrary*.

Проект *EngineClasses* є ядром обчислення крайової задачі (2). У його основі лежить абстрактний клас *Tasking*, що спадкує інтерфейс *ICalculateAble*. В інтерфейсі *ICalculateAble*, оголошується єдиний метод *Calculate()*, в якому буде впроваджено чисельний метод кінцевих різниць для кожного блоку. Цей метод реалізується в абстрактному класі *Tasking*.

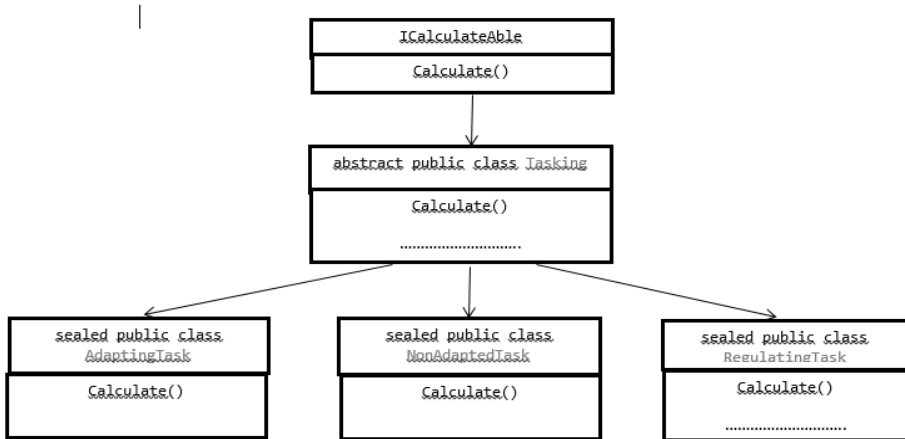


Рис. 8. UML-діаграма класів проекту EngineClasses

Абстрактний клас Tasking реалізують класи NonAdaptedTask (розв’язання завдань блоку 1), AdaptingTask (розв’язання завдань блоку 2), RegulationTask (розв’язання завдань блоку 3). UML-діаграму архітектури класів проекту EngineClasses подано на Рис. 8.

Проект UserControllsLibrary, створений за допомогою технології Window Form, забезпечує користувальницький інтерфейс інформаційної технології MuscleController.

Для перевірки роботи технології MuscleController було реалізовано юніт-тести у проекті Testing. Юніт-тести дають змогу швидко і автоматично протестувати окремі компоненти технології. Юніт-тести розроблено за допомогою фреймворку MS Test: від компанії Microsoft, які включено у Visual Studio.

Керування усіма проектами здійснює проект MuscleController.

АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ MUSCLECONTROLLER

Розроблена технологія дає змогу працювати з блоками, комбінуючи їх парно: блок 1 разом з блоком 2 і блок 1 - з блоком 3. Блок 1 забезпечує розрахунки параметрів КРК у разі рівномірного розподілу мітохондрій, тобто $mrr(x, y, z) = const$. Вхідні параметри задає експериментатор.

Вхідні параметри експериментів, які проводилися нами для демонстрації можливостей інформаційної технології, подані на Рис 9.

Зауважимо, що до вхідних параметрів блоків 2 і 3 належать розраховані у блоці 1 значення $r_1(x, y, z)$. Після опрацювання технологією введених даних, були отримані результати, показані на Рис.10.

Блоки 2 і 3 призначено для розрахунку параметрів КРК у разі нерівномірного розподілу мітохондрій. Розрахунок параметрів КРК кожного блоку (output1, output2, output3) створює поле коефіцієнтів r , характерне для вибраного режиму. За певних умов в області, віддаленій від джерела кисню, виникає зона зниження pO_2 і зниження швидкості споживання кисню — область гіпоксії, де

pO_2 менше критичного значення, $VO_2 < mrr$, тобто у цій зоні утворюється підвищена продукція активних форм кисню (АФК). Розглянути особливості КРК дає змогу матричне подання зони гіпоксії — розподіл r у поздовжньому перетині клітини, що проходить через її вісь (Рис. 11). Це унаочнює «портрет» гіпоксії у м'язовому волокні. Розподіли $pO_2(x, y, z)$ в крові капіляра $pO_2(l, l, z)$, а також $VO_2(x, y, z)$ і $r(x, y, z)$ можна виводити на екран у вигляді графіків їхніх середніх значень або матриць, як показано на Рис. 11, якщо потрібно розглянути континуум значень pO_2, r, VO_2 . На Рис. 11 подано портрет гіпоксії у поздовжньому перетині міоцита за умов, показаних на Рис. 1 справа.

У правому нижньому кутку матриці на (Рис. 11) видно найважчу гіпоксію, тут швидкість споживання кисню найменша. Можна оцінити протяжність і глибину гіпоксії за числами, зазначеними у розрахункових точках. Зліва, у верхній частині перетину, у верхньому кутку і вздовж судини (координати 1, 1, z) кисневий запит повністю задовольняється.

Якщо ввести множину r з блоку 1 до блоку 2 і розподілити вхідну змінну mrr пропорційно значенням r , отримаємо режим з mrr , розподіленим за градієнтами VO_2 [11]. Отже, за допомогою блоку 2 можна розрахувати режим КРК2 зі специфічним розподілом мітохондрій — пропорційним градієнту споживання кисню у клітині і порівняти його з режимом КРК1, у якого такі ж параметри доставки кисню.

Input parameters of block 1		Input parameters of block 3	
$C_{A,O2}$:	0,19	$C_{A,O2}$:	0,16
F :	20	F :	30
L :	0,1	L :	0,1
mrr :	4	mrr :	6
K_m :	1	K_m :	1
icd:	0,0049	icd:	0,005
$C_{A,O2max}$:	0,2	$C_{A,O2max}$:	0,2
pH:	7,3	pH:	7,3
D:	1,3E-05	D:	1,3E-05

Рис. 9. Вхідні дані експерименту.

Conclusion of block 1		Conclusion of block 2		Conclusion of block 3	
VO_2c	3,367	VO_2c	3,047	VO_2c	4,175
pO_2a	85,189	pO_2a	85,189	pO_2a	52,102
pO_2v	9,833	pO_2v	13,722	pO_2v	9,523
pO_2t	17,060	pO_2t	17,493	pO_2t	14,273
pO_2min	0,328	pO_2min	1,793	pO_2min	0,806
r	0,842	r	0,905	r	0,838
avd	0,168	avd	0,152	avd	0,139

Рис.10. Вихідні параметри блоків експерименту

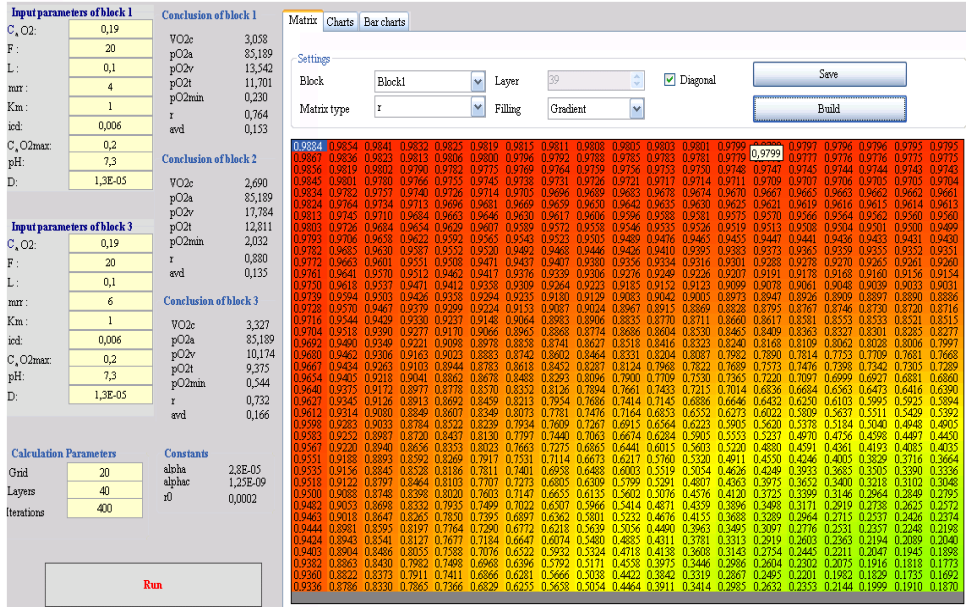


Рис. 11. Портрет гіпоксії

Блок 3 дає інформацію про КРК3 з довільно заданими параметрами. Оскільки мітохондрії можуть розподілятися тим чи іншим чином залежно від умов доставки і споживання кисню і впливати на pO_2 і VO_2 , можна вибрати $r(x, y, z)$ з блоку 1 і ввести його в блок 3 як множину коефіцієнтів $r(x, y, z)$. Таким чином досліджуються впливи (наприклад, тренувань) на розподіл мітохондрій, отриманий в одному режимі, на КРК в іншому режимі в інших умовах.

Характеристики режимів трьох блоків надано на рис. 12 та рис. 13, графіки можна розглядати спільно, що дає змогу легко зіставляти КРК 1, КРК2 і КРК3.

На рис. 12 та рис. 13 показано графіки VO_2 (а) і pO_2 (б) відповідно, які показують зміни досліджуваних показників між їхнім значенням у венозному кінці капіляра і областю найгіршого постачання.

Дослідження КРК у м'язі людини за допомогою традиційних моделей з використанням експериментальних даних твердо показали, що дифузійний параметр — щільність капілярів, є одним з найсильніших впливів на КРК, оскільки транспорт O_2 в клітині дифузійний. Включення в модель — основу запропонованої технології, ще одного дифузійного впливу — нерівномірності розподілу мітохондрій, дає змогу розглядати змінений КРК з урахуванням зв'язку між щільністю капілярної системи і розміщенням споживачів кисню. Запропонована технологія уможливить оцінювання ефективності регулювання КРК не тільки за рахунок кровообігу, але й шляхом змін динаміки мітохондрій в клітині.

Зарубіжні дослідження окремих КРК за допомогою моделі «клітинний автотомат», відмінної від нашої [15], і даних експериментів на тваринах показали збіги висновків з нашими, а також підтвердили значимість розподілу мітохондрій у клітині [12–14]. Запропонована нами технологія дає змогу стверджувати, що розподіл мітохондрій має реальний істотний вплив на дифузю і КРК [1, 6, 8, 12–14]. Якщо водночас врахувати варіабельність максимальної окисної потужності мітохондрій, то стане очевидним, що під поняттями середньої швидкості

споживання кисню і кисневим запитом ховається велика різноманітність значень споживання кисню.

У дослідженнях КРК людини найважливішими взаємопов'язаними дифузійними параметрами O_2 в клітині є нерівномірність розподілу потужностей мітохондрій, а міжкапілярні відстані оцінюються рідко і з великими труднощами. Їхне різноманіття у реальних об'єктах чекає на своїх дослідників. Ми закликаємо дослідників реальних об'єктів звертати увагу на пару «міжкапілярна відстань — нерівномірність розподілу мітохондрій» і, по можливості оцінювати їх разом, так як нехтування цим зв'язком з метою спрощення спотворює уяву про кисневе постачання міоцита. У майбутньому ми плануємо розширити можливості технології, включивши в розгляд довільний розподіл мітохондрій і інших параметрів клітини. Це дасть можливість використовувати у розрахунках конкретні дані про гетерогенність внутрішньоклітинного середовища, отримані морфологами на живому об'єкті.

Потрібно підкреслити, що перебудова мітохондрій у реальних клітинах може виконувати одне або декілька різних фізіологічних завдань і регулювання КРК є найважливішою, але не єдиною з них! Отже, можливі варіанти розподілу мітохондрій, необхідні для інших завдань, не обов'язково будуть кращі для КРК, адже сполучення кількості мітохондрій і їхня потенційна потужність — це два ступеня свободи, що створюють певний простір для свободи їхнього вибору у регуляції КРК. Працюючи з технологією, ми змогли фізично обґрунтувати гіпотезу, згідно з якою у разі гіпоксії мітохондрії можуть регулювати КРК різними способами. Запропонована технологія дає змогу розглядати ці способи, що забезпечує можливість надалі вивчати вплив реорганізації мітохондрій, який виникає в одному режимі, для адаптації клітини до роботи в іншому режимі.

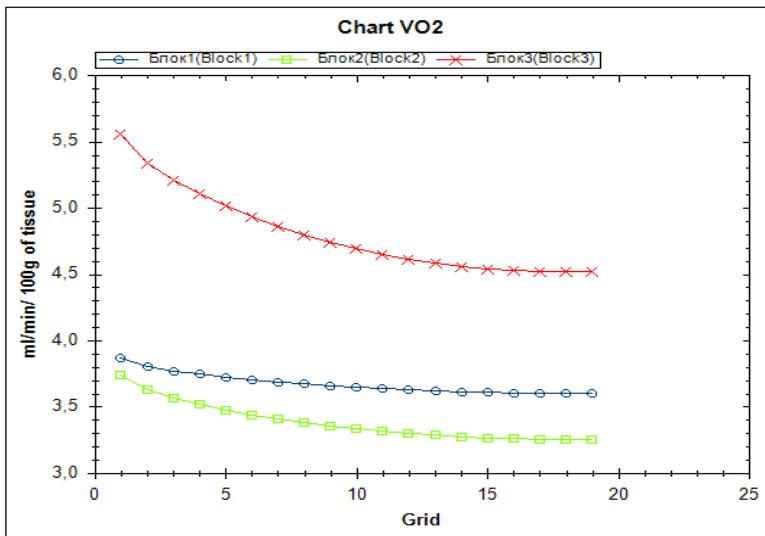


Рис. 12. Графіки VO_2

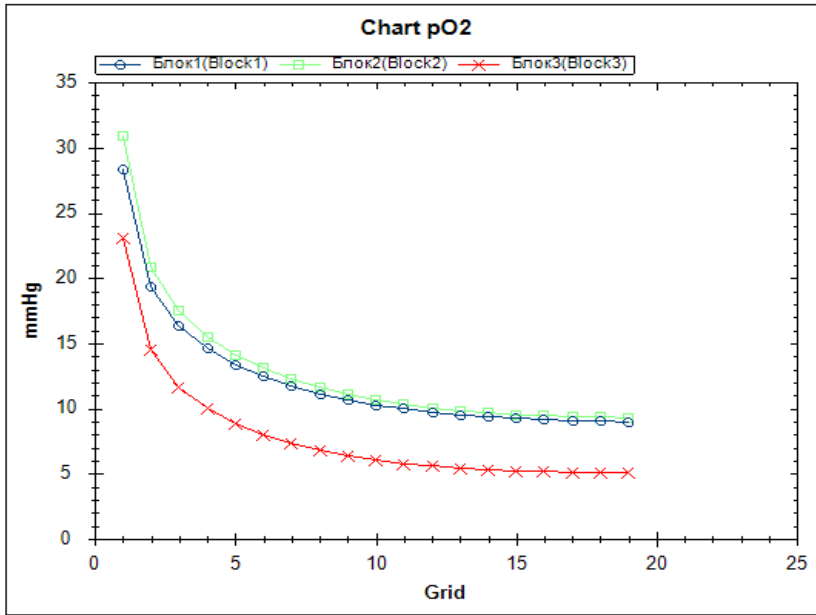


Рис. 13. Графіки pO_2

На закінчення відзначимо, що крім питань регуляції розподілу мітохондрій у клітині і його оптимальності, які мають теоретичний інтерес, безліч робіт останніх років мають прикладну спрямованість. В них мітохондрії розглядають як мішень для лікування серцево-судинних, нейродегенеративних захворювань і, особливо, раку [12–15]. Очевидно, дослідження властивостей і поведінки мітохондрій були і залишаються важливими для вирішення актуальних завдань фізіології та медицини.

ВИСНОВКИ

Розроблена інформаційна технологія для розрахунків параметрів кисневого режиму клітин скелетного м'яза з нерівномірним розподілом мітохондрій уможливило дослідження розподілу внутрішньоклітинних швидкостей споживання кисню, напруг кисню, їхніх значень кисневого запиту.

Виявлено необхідність сумісних експериментальних досліджень щільності капілярів і розподілу мітохондрій у клітині, щоб наблизити розрахункові характеристики КРК до реальності і отримати нову інформацію про шляхи регулювання КРК і їхню ефективність.

ЛІТЕРАТУРА

1. Pathi B, Kinsey ST, Locke BR. Oxygen control of intracellular distribution of mitochondria in muscle fibers. *Biotechnol Bioeng.* 2013; 110 ,9. p.2513–24.
2. Zuo L, Shiah A, Roberts WJ, Chien MT, Wagner PD, Hogan MC. Low P_{O_2} conditions induce reactive oxygen species formation during contractions in single skeletal muscle fibers. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol.* 2013; 304(11): R1009-16.
3. P.C. Hart MnSOD upregulation sustains the Warburg effect via mitochondrial ROS and AMPK-dependent signalling in cancer. *Nature communications*, 2015, P. 13–14.

4. McBride H M, Neuspiel M., Wasiak S. Mitochondria: more than just a powerhouse. *Curr. Biol.* 2006 V25;16(14):R551-60.
5. Giacomello M, Pyakurel A, Glytsou C, Scorrano L. The cell biology of mitochondrial membrane dynamics. *Nat Rev Mol Cell Biol.* 2020;21(4). p. 2043–22.
6. Kajar S.R., Hoppeler H. Essen-Gustavson B., Scherzmann K. The similarity of mitochondrial distribution in equine skeletal muscle of differing oxidative capacity. *Journal Experimental Biology.* 1988. Vol.137. P. 2533–63.
7. Hoppeler H., Fluck M. Plasticity of skeletal muscle mitochondria: structure and function. *Med Sci. Sports Exerc.*, 2003. V 35, № 1, p. 953–104.
8. Mainwood G., Racusan K. A model for intracellular energy transport. *Can. J. Physiol. and Pharmacol.* 1982, vol. 60, № 1, p. 983–102.
9. Grunewald W. Computer calculation for tissue oxygenation and the meaningful presentation of results. *Oxygen transport to tissue*, 1973. v. 126 p. 783–792.
10. Е.Г.Лябах Математические модели для исследования влияния оксида азота и миоглобина на кислородный режим клетки. *Кибернетика и вычисл. техника.* 2013, Вып. 173, с. 85–92.
11. K. G. Lyabakh, P. N. Lissov Oxidative power and intracellular distribution of mitochondria control cell oxygen regime when arterial hypoxemia occurs. *Biophysics*, 2012, vol. 57, № 5, p. 628–633.
12. K G. Liabakh Oxidative power and intracellular distribution of mitochondria regulate cell oxygen regime under circulatory hypoxia. *International Journal of Physiol. Pathophysiol.* 2018, vol. 9, № 1, p. 99–108.
13. К.Г.Лябах. Регулювання кисневого режиму клітини на основі дифузії. *Фізіол. журнал*, 2019, т. 65, №3, с.12–21.
14. Lyabakh K, Mankovskaya I. Oxygen transport to skeletal muscle working at VO₂max in acute hypoxia: theoretical prediction. *Comparative Biochem. and Physiol. Part A.* 2002.- vol.132. - p. 53-60
15. Ralph S. Rodriguez-Enriquezb S. Neuzil J.Saavedra E, Moreno-Sanchez R. The causes of cancer revisited: “Mitochondrial malignancy” and ROS-induced oncogenic transformation — Why mitochondria are targets for cancer therapy *Molecular Aspects of Medicine.* 2010,31, p. 145–70

Отримано 01.09.2020

REFERENCES

1. Pathi B, Kinsey S.T., Locke B.R. Oxygen control of intracellular distribution of mitochondria in muscle fibers. *Biotechnol Bioeng.* 2013, 110, 9, pp. 2513–24.
2. Zuo L, Shiah A., Roberts W.J., Chien M.T., Wagner P.D., Hogan M.C. Low P_{o₂} conditions induce reactive oxygen species formation during contractions in single skeletal muscle fibers. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol.* 2013; 304(11): R1009-16.
3. Hart P.C. MnSOD upregulation sustains the Warburg effect via mitochondrial ROS and AMPK-dependent signalling in cancer. *Nature communications*, 2015, P. 13–14.
4. McBride H. M., Neuspiel M., Wasiak S. Mitochondria: more than just a powerhouse. *Curr. Biol.* 2006 V25;16(14):R551-60.
5. Giacomello M, Pyakurel A, Glytsou C, Scorrano L. The cell biology of mitochondrial membrane dynamics. *Nat Rev Mol Cell Biol.* 2020;21(4). p. 204–22.
6. Kajar S.R., Hoppeler H. Essen-Gustavson B., Scherzmann K. The similarity of mitochondrial distribution in equine skeletal muscle of differing oxidative capacity. *Journal Experimental Biology.* 1988. Vol. 137. P. 253–63.
7. Hoppeler H., Fluck M. Plasticity of skeletal muscle mitochondria: structure and function. *Med Sci. Sports Exerc.*, 2003. V 35, № 1, p. 95–104.
8. Mainwood G., Racusan K. A model for intracellular energy transport. *Can. J. Physiol. and Pharmacol.* 1982, vol. 60, № 1, p. 98–102.
9. Grunewald W. Computer calculation for tissue oxygenation and the meaningful presentation of results. *Oxygen transport to tissue.* 1973. v. 126 p. 783–792.

10. Liabakh K. G. Mathematical models for studying the effect of nitric oxide and myoglobin on the oxygen regime of the cell. *Kibernetika i vychislitel'naâ tehnika*. 2013, no. 173, pp. 85–92. (In Russian)
11. Lyabakh K. G., Lissov P. N. Oxidative power and intracellular distribution of mitochondria control cell oxygen regime when arterial hypoxemia occurs. *Biophysics*, 2012, vol. 57, № 5, p. 628–633.
12. Liabakh K. G. Oxidative power and intracellular distribution of mitochondria regulate cell oxygen regime under circulatory hypoxia. *International Journal of Physiol. Pathophysiol.* 2018, vol. 9, №1, p. 99–108.
13. Liabakh K. G. Reguluvannya kysneвого reshimy klityny na osnovi difuzii. *Fisiol. Jurnal*, 2019, vol. 65, №3, p.12–21. (In Ukrainian)
14. Lyabakh K, Mankovskaya I. Oxygen transport to skeletal muscle working at VO_{2max} in acute hypoxia: theoretical prediction. *Comparative Biochem. and Physiol. Part A*.2002.Vol. 132. P. 53–60
15. Ralph S. Rodriguez-Enriquezb S. Neuzil J.Saavedra E, Moreno-Sanchez R. The causes of cancer revisited: “Mitochondrial malignancy” and ROS-induced oncogenic transformation — Why mitochondria are targets for cancer therapy *Molecular Aspects of Medicine*. 2010,31, p.145–70.

Received 01.09.2020

Lyabakh K.G.¹, DSc (Biology),
Leading Researcher,
the Department of Complex Research of Information Technologies
e-mail: katya.e.g@gmail.com

Dukhnovska K.K.²,
Assistant of the Applied Information Systems Department
Faculty of Information Technologies
e-mail: duchnov@ukr.net

¹ International Research and Training Centre
for Information Technologies and Systems
of the NAS and MES of Ukraine,
40, Glushkov av., 03187, Kyiv, Ukraine

² Taras Shevchenko National University of Kyiv
60, Volodymyrska st., 01033, Kyiv, Ukraine

INFORMATION TECHNOLOGY FOR STUDYING THE OXYGEN REGIME OF MUSCLE CELL

Introduction. On the basis of the mathematical model the information technology for research of oxygen modes of a cell (myocyte) for calculation of distribution of intracellular rates of oxygen consumption VO_2 , pO_2 pressures, their average values and area of hypoxia as a set of ratios of VO_2 to values of oxygen request is developed.

The purpose of the paper is to create a user-friendly technology for the analysis of the oxygen regime of the cell with the heterogeneity of mitochondrial oxidative power within the human myocyte in the blood-cell-mitochondria system. Blood flow, its oxygen-transport properties, load, capillary geometry, as well as uneven distribution of mitochondria as oxygen consumers are the basic parameter for calculations

Methods. At the stage of mathematical modeling the apparatus of mechanics of continuous media, differential equations in partial derivatives is applied. Numerical methods, object-oriented C # programming language, ASP Core technology were used at the stage of development of information technology of oxygen regime of human muscle cell. The results of calculations of different modes characterize them as a whole and at different points of the cell, they are presented in the form of tables, graphs and descriptions of fields in matrix form, they are easy to compare with each other on one screen.

Results. *The technology is designed to use a standard set of indicators of O₂ transport and utilization to study the oxygen supply of working human skeletal muscle. It gives a possibility to study mitochondria under hypoxia that regulate oxygen cell supply by different ways. The proposed technology allows studying the effect of mitochondrial reorganization that occurs under some conditions, on the adaptation processes of the cell working under another one. The technology revealed the importance of the connection between the intercapillary distance and the heterogeneity of mitochondria as a factor influences on tissue oxygen regime.*

Proposed information technology revealed the need for joint experimental studies of capillary density and mitochondrial distribution in the cell to bring the calculated characteristics of oxygen modes to reality and to obtain new information about the ways of their regulation.

Conclusion. *Proposed information technology may be used for study of oxygen mode parameters in human muscles under adaptation to hypoxia with the aid of mitochondria.*

Keywords: *information technology, models of transport and utilization of oxygen in muscle, oxygen regime, muscle cell, hypoxia, mitochondrial heterogeneity, mitochondrial oxidizing power, intercapillary distance, diffusion.*

System Index of Articles Published in 2020

УШАНУВАННЯ ПАМ'ЯТІ АКАДЕМІКА Б.Є. ПАТОНА 3(201)

Informatics and Information Technologies

- KYYKO V.M. Matching Based Multistyle License Plate Recognition 1(199)
- BILOSHYTSKA O.K., NASTENKO Ie.A., PAVLOV V.A. The Use of Complexity and Variability Characteristics for the Analysis of Complex Dynamic Systems 1(199)
- CHABANIUK V.S., KOLIMASOV I.M. Analysis of the Practical Use of Geoinformation Systems for Territorial Management and Determination of Their Critical Properties 2(200)
- СРМАКОВА І.Й., НІКОЛАЄНКО А.Ю., БОГАТЬОНКОВА А.І., ГРИЦАЮК О.В., КРАВЧЕНКО П.М. Інформаційна технологія прогнозування стану людини за екстремальних умов 2(200)
- CHABANIUK V.S., POLYVACH K.A. Critical Properties of Modern Geographic Information Systems for Territorial Management 3(201)
- АНІСИМОВ А.В., ЗАВАДСЬКИЙ І.О., ЧУДАКОВ Т.С. Застосування мультироздільникових кодів до архівування природномовних текстів 4(202)
- SUROVTSEV I.V., VELKYI P.Yu., GALIMOVA V.M., SARKISOVA M.V. Ionometric Method for Determination of Concentrations of Microelements in Research of Digital Medicine 4(202)

Intelligent Control and Systems

- MISHCHENKO M.D., GUBAREV V.F. Methods of Model Predictive Control for Discrete Multi-Variable Systems with Input 1(199)
- GRITSENKO V.I., VOLKOV O.Ye., BOGACHUK Yu.P., GOSPODARCHUK O.Yu., KOMAR M.M., SHEPETUKHA Yu.M., VOLOSENIUK D.O. Intellectual Control, Localization and Mapping in Geographic Information Systems Based on Analysis of Visual Data 2(200)
- ZHITECKII L.S., AZARSKOV V.N., SUSHCHENKO O.A., YANOVSKY F.J., SOLOVCHUK K.Yu. Control of a Nonsquare Multivariable System Using Pseudoinverse Model-Based Static Output Feedback 3(201)
- ВОЛКОВ О.Є., ПАВЛОВА С.В., СІМАХІН В.М., СЕМЕНОГ Р.В. Комплекс моделювання динамічних конфліктних ситуацій повітряних кораблів у масштабі реального часу 3(201)
- ODARCHENKO R.S., VOLKOV O.Ye., SIMAKHIN V.M., GOSPODARCHUK O.Yu. Technology of Intelligent Control of Unmanned Aerial Vehicles Monitoring in the Airspace Using 5G Cellular Networks 4(202)

Medical and Biological Cybernetics

GRITSENKO V.I., FAINZILBERG L.S. Current State and Prospects for the Development of Digital Medicine	1(199)
АЗАРХОВ О.Ю., ЧЕРНИШОВА Т.А. Застосування інформаційної технології визначення циркулюючих пухлинних клітин для діагностування злоякісних пухлинних захворювань	1(199)
KOCHINA M.L., KOZAK L.M., YAVORSKY O.V., FIRSOV O.G., YEVTUSHENKO A.S. Model and Method for Evaluation and Forecast of the Changes of Visual System Functional State in Consequence of Visual Work	2(200)
БСЛОВ В.М., ГОНТАР Т.М., КОБЗАР Т.А., КОЗЛОВСЬКА В.О. Інформаційна технологія самооцінювання здоров'я для реабілітації пост-травматичного стресового розладу	2(200)
KIFORENKO S.I., VASYLIEV I.Yu., ORLENKO V.L., IVASKIVA K.Yu., OBELETS T.A. Hierarchical Simulation. Algorithm for Prediction of Glycemic Profile for Diabetes	3(201)
VOVK M.I., KUTSIAK O.A. Information Technology for Forming a Personal Movement Rehabilitation Plan After a Stroke	3(201)
ANTOMONOV M.Yu. Imitation of Compensator and Adaptive Processes In Biosystems	4(202)
ЛЯБАХ К.Г., ДУХНОВСЬКА К.К. Інформаційна технологія вивчення кисневого режиму м'язової клітини	4(202)

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

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

Вимоги до рукописів статей

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

- анотації — українською та англійською мовами (прізвище, ініціали автора/ів, місце роботи, місто, країна, назва статті, текст 250 -300 слів, з виділенням рубрик: вступ, мета, результати, висновки, ключові слова 5–8 слів);

- список літератури мовою оригіналу — у порядку згадування в тексті, за стандартом ДСТУ 8302:2015;

- список літератури — переклад джерел англійською мовою, прізвища та ініціали авторів — транслітерація;

- ліцензійний договір;

- відомості про автора/ів українською та англійською мовами повинні містити: ПІБ, вчений ступінь, наукове звання, посада, відділ, місце роботи, поштова адреса організації, телефон (для зв'язку редактора), E-mail, авторські ідентифікатори ORCID або ResearcherID.

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

Вимоги до текстового файлу

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

Використовувані стилі: шрифт Times New Roman, 12 пт, міжрядковий інтервал – 1,5. Формат паперу А4, всі береги — 2 см.

Формули набирають у редакторах формул Microsoft Equation Editor 3.0. та MathType 6.9b. Опції редактора формул — (10,5; 8,5; 7,5; 14; 10). **Ширина формул — до 12 см.**

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

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

Передплату на журнал (друкована версія) в Україні здійснюють:

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