

# Cyber- netics

2<sup>(204)</sup>  
2021

КІБЕРНЕТИКА ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

ISSN 2663-2586 (Online)  
ISSN 2663-2578 (Print)

and

COMPUTER  
ENGINEERING

## Editorial board

Gritsenko V.I. — Editor-In-Chief (International Research and Training Center for International Technologies and Systems Kyiv, Ukraine)

Kozak L.M. — Deputy Editor (IRTCITS, Kyiv, Ukraine)

### Computer Science and Information Technologies:

Abdel-Badeeh M. Salem (*Ain Shams University, Cairo, Egypt*), Abraham A. (*Machine Intelligence Research Labs, Washington USA*), Fainzilberg L.S. (IRTCITS, Kyiv, Ukraine), Gorbunovs A. (*Riga Technical University, Riga, Latvia*), Gubarev V.F. (*Institute of Space Research, Kyiv, Ukraine*), Rachkovskij D.A. (IRTCITS, Kyiv, Ukraine), Wunsch D.C. (*Missouri University of Science & Technology, Rolla, USA*)

### Applied Mathematics:

Anisimov A.V. (*T. Shevchenko National University, Kyiv, Ukraine*), Chikrii A.O. (*Glushkov Institute of Cybernetics of the NASU, Kyiv, Ukraine*), Gupal A.M. (*Glushkov Institute of Cybernetics, Kyiv, Ukraine*), Kogut P.I. (*Dnipropetrovsk State University, Dnipro, Ukraine*), Mordukhovich Boris (*Wayne University, Detroit, USA*), Vlahavas I. (*Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece*)

### Technologies of medical diagnostics and treatment:

Azarhov O.Yu. (*Priazovsky State Technical University, Mariupol, Ukraine*), Belov V.M. (IRTCITS, Kyiv, Ukraine), Kovalenko O.S. (IRTCITS, Kyiv, Ukraine), Rybak I. (*Drexel University College of Medicine, Philadelphia, USA*), Yavorsky O.V. (*Kharkiv State Medical University, Kharkiv, Ukraine*)

### Biology:

Antomonov M.Yu. (*Marzyeyev Institute of Public Health, Kyiv, Ukraine*), Ermakova I.I. (IRTCITS, Kyiv, Ukraine), Knigavko V.G. (*Kharkiv State Medical University, Kharkiv, Ukraine*), Kochina M.L. (*Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv*), Navakatikyan M., (*National Centre for Classification in Health, Sydney, Australia*)

The journal is included in the List of Scientific Professional Editions of the Ministry of Education and Science of Ukraine (MESU) for PhD applicants, category “B”, in biological and medical sciences, (order of the MES of Ukraine № 409, 17.03.2020), technical and physical-mathematical sciences (order of the MES of Ukraine № 1188, 24.09.2020)

The journal is included in Google Scholar, information resource Scientific Periodicals of Ukraine (V.I. Vernadsky NLU), ULRICHS WEB, Crossref (DOI), ROAD, DOAJ, Index Copernicus, Electronic Journals Library (Germany)

Certificate of State Registration KB № 12649-1533P, 14.05.2007

## Editorial address:

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

**International Research and Training Center**

**for Information Technologies and Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine and the Ministry of Education and Science of Ukraine**

Phon: 503 95 62. E-mail: [kvt.journal@kvt-journal.org.ua](mailto:kvt.journal@kvt-journal.org.ua), <http://kvt-journal.org.ua/>

Executive secretary *Pezentsali H.O.*

Editor *Charchiyan N.A.*

Computer layout *Tupalskiy O.V.*

Web-master *Voychenko O.P.*

Підп. до друку 30.06.2021. Формат 70×108/16. Гарн. Times New Roman.  
Ум. друк. арк. 10,33. Обл. вид. арк. 9,84. Тираж 66. Зам. №

---

Віддруковано ВД “Академперіодика” НАН України  
01004, Київ 4, вул. Терещенківська, 4.

Свідцтво про внесення до Державного реєстру суб'єкта видавничої справи  
Серії ДК № 544 від 27.07.2001 р.

# Cybernetics and Computer Engineering

2 (204)/2021

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

## CONTENTS

### Informatics and Information Technologies

ГРИЦЕНКО В.І., БАБАК О.В., СУРОВЦЕВ І.В. Особливості взаємозв’язку мереж 5G, 6G з великими даними, інтернетом речей та штучним інтелектом ..... 5

CHABANIUK V.S., KOLIMASOV I.M., KRAKOVSKYI S.P. Critical Systemic Properties of Electronic Atlases New Generation. Part 1: Problem and Research Methods ..... 20

### Intelligent Control and Systems

ШЕПЕТУХА Ю.М., ВОЛКОВ О.Є., КОМАР М.М. Інтелектуалізація процесів прийняття рішень в автономних системах керування ..... 49

### Medical and Biological Cybernetics

FAINZILBERG L.S., SOLOVEY S.R. Self-learning Information Technology for Detecting Respiratory Disorders in Home Conditions ..... 64

VOVK M.I., KUTSIK O.A. AI-Technology of Motor Functions Diagnostics after a Stroke ..... 84

To Attention of Authors ..... 101

# Cybernetics and Computer Engineering

2 (204)/2021

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

## CONTENTS

### Informatics and Information Technologies

GRITSENKO V.I., BABAK O.V., SUROVTSEV I.V. Peculiarities of Interconnection 5G, 6G Networks With Big Data, Internet of Things and Artificial Intelligence ..... 5

CHABANIUK V.S., KOLIMASOV I.M., KRAKOVSKYI S.P. Critical Systemic Properties of Electronic Atlases New Generation. Part 1: Problem and Research Methods ..... 20

### Intelligent Control and Systems

SHEPETUKHA Yu.M., VOLKOV O.Ye., KOMAR M.M. Intellectualization of Decision Making Processes in Autonomous Control Systems ..... 49

### Medical and Biological Cybernetics

FAINZILBERG L.S., SOLOVEY S.R. Self-learning Information Technology for Detecting Respiratory Disorders in Home Conditions ..... 64

VOVK M.I., KUTSIK O.A. AI-Technology of Motor Functions Diagnostics after a Stroke ..... 84

To Attention of Authors ..... 101

# Кібернетика 2 (204)/2021 та обчислювальна техніка

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

## ЗМІСТ

### Інформатика та інформаційні технології

ГРИЦЕНКО В.І., БАБАК О.В., СУРОВЦЕВ І.В. Особливості взаємозв'язку мереж 5G, 6G з великими даними, інтернетом речей та штучним інтелектом .....	5
ЧАБАНЮК В.С., КОЛІМАСОВ І.М., КРАКОВСЬКИЙ С.П. Критичні системні властивості електронних атласів нового покоління. Частина 1: Проблема і методи дослідження .....	20

### Інтелектуальне керування та системи

ШЕПЕТУХА Ю.М., ВОЛКОВ О.Є., КОМАР М.М. Інтелектуалізація процесів прийняття рішень в автономних системах керування .....	49
--	----

### Медична та біологічна кібернетика

ФАЙНЗІЛЬБЕРГ Л.С., СОЛОВЕЙ С.Р. Самонавчальна інформаційна технологія для виявлення респіраторних порушень у домашніх умовах .....	64
ВОВК М.І., КУЦЯК О.А. AI-технологія діагностики рухових функцій після інсульту .....	84

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



# Informatics and Information Technologies

---

DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt204.02.005>

UDC: 007.330.341

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

**БАБАК О.В.**, канд. техн. наук,  
старш. наук. співроб. відд. екологічних цифрових систем  
ORCID: 0000-0002-7451-3314  
e-mail: [dep175@irtc.org.ua](mailto:dep175@irtc.org.ua)

**СУРОВЦЕВ І.В.**, д-р. техн. наук, старш. наук. співроб.,  
зав. відд. екологічних цифрових систем  
ORCID: 0000-0003-1133-6207  
e-mail: [dep175@irtc.org.ua](mailto:dep175@irtc.org.ua); [igorsur52@gmail.com](mailto:igorsur52@gmail.com)  
Міжнародний науково-навчальний центр  
інформаційних технологій та систем  
НАН України та МОН України,  
пр. Акад. Глушкова 40, м. Київ, 03187, Україна

## ОСОБЛИВОСТІ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МЕРЕЖ 5G, 6G З ВЕЛИКИМИ ДАНИМИ, ІНТЕРНЕТОМ РЕЧЕЙ ТА ШТУЧНИМ ІНТЕЛЕКТОМ

---

***Вступ.** Технології мобільного зв'язку 5G, 6G, які активно розвиваються у світі, та Інтернет речей, великі дані, штучний інтелект тісно переплітаються. Важливо розуміти особливості взаємозв'язку, щоб ефективно використовувати їх у нових інтелектуальних інформаційних технологіях.*

***Мета статті** — виділення найважливіших особливостей взаємозв'язку, які визначаються на основі досвіду впровадження технологій 5G та 6G.*

***Результати.** Технології інтернету речей застосовують мережі 5G, 6G, а також хмарні, туманні та граничні обчислення для високошвидкісного зв'язку з пристроями. Для аналізу великих даних використовують методи машинного навчання, нейронні мережі та імітаційне моделювання. Алгоритми штучного інтелекту є невід'ємною частиною всіх технологій, вони дають змогу здійснити інтелектуальне підключення та керування мережами зв'язку 5G/6G, інтернетом речей та великими даними. Основними тенденціями розвитку 5G/6G будуть конвергенція комунікацій, застосування 3D-мереж, терагерцевого спектру, квантових технологій, штучного інтелекту та глибокого навчання.*

© ГРИЦЕНКО В.І., БАБАК О.В., СУРОВЦЕВ І.В., 2021

ISSN 2663-2586 (Online), ISSN 2663-2578 (Print). Cyb. and Comp. Eng. 2021. № 2 (204)

**Висновки.** Використання мереж швидкісного зв'язку 5G та 6G, технологій інтернету речей, хмарних обчислень, аналізу великих даних та штучного інтелекту є необхідною умовою для подальшого розвитку цифрової економіки, автоматизації виробництва, розумної охорони здоров'я та побудови розумного міста.

**Ключові слова:** мережі зв'язку, великі дані, інтернет речей, штучний інтелект, машинне навчання.

## ВСТУП

За останні 40 років кожне десятиріччя змінюються покоління мереж мобільного зв'язку 1G–4G. Однак, якщо стільникові мережі 1G вже зникли, то мережі 2G–4G досі продовжують функціонувати. Водночас частина інфраструктури мережі 3G, 4G поступово увійде до складу мобільних мереж нового п'ятого покоління 5G, технічні характеристики яких досить докладно наведено в [1]. Технології 1G–4G надали можливість здійснити зв'язок з Інтернетом, тому спостерігається єдність та спадкоємність взаємозв'язку 5G з попередніми поколіннями зв'язку. Цілком закономірно, що мережі 5G стануть фундаментом цифрової економіки та відкриють дорогу наступному поколінню 6G, широке впровадження якого може розпочатись, мабуть, вже в 2030 році [2, 3].

Необхідність переходу до 5G пов'язана не тільки зі збільшенням внаслідок технічного прогресу потоків інформації, тобто Великими даними (BD — Big Data), а й економічними причинами. Справа в тому, що витрати на пропускання підвищеного трафіку в мережах зв'язку станом на 2020 рік не покриваються доходами від традиційних послуг, а пошуки нових послуг не дають очікуваних результатів. Відмічено, що основне зростання трафіку та доходів спостерігається не в секторі пристроїв, що їх використовують люди, а в секторі пристроїв інтернету речей (IoT — Internet of Things), особливо у його складнику — Промисловому інтернеті речей (IIoT — Industrial Internet of Things). Саме ця обставина й визначила мету створення та призначення мереж 5G, функційними особливостями яких є [4]:

- широкосмуговий мобільний зв'язок (eMBB — Extreme Mobile Broadband);
- наднадійні комунікації з малою затримкою (ULLRC — Ultra Low Latency Reliable Communication);
- масова міжмашинна комунікація (mMTC — Massive Machine Type Communication), підтримка IoT, IIoT (ультра вузькополосний зв'язок).

На основі цих трьох особливостей будуватиметься все різноманіття послуг та можливостей мереж 5G, найхарактерніші з яких наведено в запропонованій роботі.

Стан впровадження мереж 5G у 2020 році у країнах світу дуже різноманітний: так, у Китаї встановлено 700 тис. базових станцій 5G, що відповідає 70% від їхньої загальної кількості у світі; у США компанії Venson, Ericson та Qualcomm Technologies вперше в світі досягнули швидкості 5G-з'єднань понад 5 Гбіт/с, Федеральна комісія США почала проводити аукціони з продажу частот 5G; в Росії затверджено дорожню карту розвитку 5G та почалося будівництво першої корпоративної 5G-мережі; в Україні для мереж 5G почали звільняти зайняті телебаченням частоти 790–862 МГц та 694–790 МГц.

Разом з цим, Фінляндія та Китай ще у 2018 році почали досліджувати технології, пов'язані з новим поколінням зв'язку — 6G, що працює в терагерцевому діапазоні частот, а в 2019 році США прийняли рішення про відкриття спектру «ТГц-хвиля» для 6G. Однак сьогодні мовиться в основному лише про концепцію технології 6G та передбачувані тренди її розвитку. Проте, у 2020 році у світі почалася активна робота й у цьому напрямку [4], зокрема: у ЄС розроблено проєкт розвитку 6G-мереж; Китай запустив перший у світі супутник для 6G зв'язку, компанія Хіаомі почала тестувати мережу 6G; LG Electronics (Південна Корея) почала розробляти технології для мереж 6G; Росія повідомила про старт робіт над 6G-мережами в Російській Федерації.

Отже, можна зробити такі висновки:

- мережі 5G разом з технологіями інтернету речей (IoT) та великих даних (BD) є основою цифрової економіки, рушійною силою якої повинен стати штучний інтелект (AI — Artificial Intelligence);
- наступником мереж 5G стануть мережі 6G.

Цілком очевидно, що між поколіннями зв'язку 5G, 6G та новими технологіями, в основу яких покладено передавання, оброблення та інтелектуальний аналіз великих масивів даних, є глибокий взаємозв'язок, особливості якого розглянуто у цій статті.

Незавершеність практичного впровадження мереж 5G та тільки концептуальне бачення майбутніх мереж 6G не дає змогу вказати конкретні властивості такого взаємозв'язку.

**Метою** дослідження є виділення, на наш погляд, найважливіших особливостей взаємозв'язку, які проглядаються на основі невеликого досвіду впровадження мереж 5G та 6G. Це визначило структуру статті, тобто послідовний розгляд розділів, пов'язаних з IoT, BD та AI.

Отже, почнемо з інтернету речей.

## **МЕРЕЖІ 5G, 6G ТА ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ**

Генератором потоків BD в мережах 5G є інтернет речей (IoT). За означенням компанії Garther (США) [4], IoT — це мережа фізичних об'єктів, що мають вбудовані технології, які дають змогу здійснювати взаємодію з навколишнім середовищем, передавати відомості про свій стан та приймати зовнішні дані. Складником IoT є промисловий інтернет речей (IIoT) — розмаїття промислових пристроїв та датчиків, підключених до мережі.

Президент Всесвітнього економічного форуму в Давосі (2016 р.) Клаус Шваб увів в масове використання термін «Індустрія 4.0», який став синонімом четвертої промислової революції. «Індустрія 4.0» змінює не тільки виробництво, але й економіку, а також взаємодію між людьми. Водночас, AI та роботизація, IoT та 3D друк, віртуальна та доповнена реальність, біо- та нейротехнології стають частиною нашого повсякдення. Характерною рисою «Індустрії 4.0» є повністю автоматизоване виробництво, яке працює у режимі реального часу. Експерти виділяють чотири базові технології: IoT та IIoT, цифрові екосистеми, аналітику BD, складні кібернетичні системи (цифрові платформи).

Засобами вимірювання в IoT можуть бути як окремі давачі, так і складні комплекси. Причому для передачі даних може бути використано

будь-яку з наявних технологій бездротових та дротових мереж зв'язку. У компанії Microsoft (США) вважають, що головна частина IoT — це не давачі та засоби передачі даних, а хмарні обчислення (Cloud computing), які забезпечують високу пропускну спроможність. Допмагають впоратись з величезними потоками інформації туманні обчислення (Fog computing), а також граничні обчислення (Edge computing). Як виконавчі, використовують пристрої, здатні перетворювати цифрові електричні сигнали, що надходять від інформаційних мереж, на конкретні дії. Часто їх конструктивно об'єднують з давачами. Передбачається, що в осяжному майбутті IoT застосовуватимуть у самих різних сферах: промислові об'єкти, транспорт (автомобілі), охорона здоров'я (пристрої визначення стану здоров'я людини), аграрний сектор (давачі моніторингу довкілля), комунальні служби (давачі зниження втрат води, електроенергії, тепла), «розумний» будинок тощо. До цього обов'язково слід додати широке застосування в торгівлі, логістиці, готельному бізнесі, банківській сфері, будівництві та в збройних силах.

Але основним джерелом великих даних (за деякими підрахунками до 70%) в мережах 5G є промисловий інтернет речей (IIoT). Тому на його особливостях слід зупинитися детальніше.

IIoT — це система об'єднаних комп'ютерних мереж і підключених до них промислових об'єктів з вбудованими давачами та програмними засобами для збирання та обміну даними з можливістю віддаленого контролю та керування в автоматизованому режимі [5]. На першому етапі впровадження IIoT на промислове обладнання встановлюють давачі, виконавчі механізми, контролери та людино-машинні інтерфейси. Отже, стає можливим збирання інформації, що дає можливість керівництву отримувати такі об'єктивні та точні дані про стан виробництва, які не залежать від людського фактору. Оброблені дані надають усім підрозділам підприємства, що дає змогу налагодити тіснішу взаємодію між останніми та приймати обґрунтовані рішення. Отриману інформацію може бути використано для запобігання позапланових простоїв, поломок устаткування та збоїв у керуванні ланцюгами постачання, даючи підприємству змогу функціонувати ефективніше.

Під час оброблення величезного масиву неструктурованих даних, що надходять з давачів, особливого значення набуває подання інформації у зрозумілому для користувача вигляді. Для цього слід використовувати вже відомі аналітичні платформи, призначені для збирання, зберігання та аналізу даних про технологічні процеси, що працюють у реальному часі.

Очікується, що IIoT надасть можливість створити виробництва, гнучкіші та ефективніші за наявні. Сучасні провідні мережі давачів у найближчі роки буде доповнено бездротовими мережами. У разі становлення IIoT виробничі підприємства з ізольованих систем перетворюватимуться на відкриті системи, які поєднують різних учасників ринку. Керування виробництвом в цих системах здійснюватиме не персонал, а хмарні сервіси.

Що стосується економічних перспектив та реальності, то ще в 2015 році компанія Accenture (США) провела широке дослідження «Успіх за допомогою Промислового інтернету речей» (Winning with the IIoT) [5]. Як вона пророкує, можливий внесок IIoT у світове виробництво в 2030 році міг

би скласти 14,2 трлн. доларів. Але цей потенційний приріст знаходиться під загрозою, бо більшість держав поки не докладають достатньо зусиль, щоб створити необхідні умови для широкого розповсюдження нових цифрових технологій. Крім того, досліджені промислові підприємства навіть не мають конкретних планів використання ІоТ.

За результатами досліджень відомої аналітичної компанії ARC Advisory Group (США) відзначено, що в розвитку ІоТ простежуються такі тенденції [5]:

- головними складниками ІоТ стають передові аналітичні інструменти — штучний інтелект та машинне навчання;
- поява цифрових двійників або цифрових копій фізичного об'єкта уможливило вирішення низки аналітичних завдань, таких як моніторинг та прогнозування стану об'єктів, діагностика відмови пристроїв та технічних систем;
- ІоТ допомагає ігровим технологіям доповненої та віртуальної реальності (AR/VR) з високим ступенем достовірності імітувати реальну обстановку на підприємстві;
- застосування MQTT (Message Queue Telemetry Transport) як основного протоколу ІоТ обміну даними добре підходить для використання в контролерах, давачах та для кібербезпеки;
- різко зростає кількість інтелектуальних пристроїв, що застосовують в граничних та туманних обчисленнях з убудованою аналітикою.

Ці тенденції розвитку ІоТ є зараз, та, зважаючи на неухильні темпи розвитку 5G у світі, будуть і в майбутньому. Однак на останній тенденції розвитку, з огляду на її виняткову важливість, слід зупинитися докладніше.

Насамперед, відзначимо деякі особливості технологій хмарних обчислень, які уможливають зберігання та оброблення даних віддалено у «хмарі» [6]. Їхніми перевагами є надійність, безпека та розвиненість на світовому ринку, а основним недоліком — затримка передавання даних. Хмарні технології широко застосовують для оброблення великих обсягів інформації, наприклад, в технологіях BD та AI, у фінансовій сфері та телекомунікаціях. Успішна реалізація цих технологій залежить від якості вхідної інформації, яку необхідно попередньо фільтрувати, що здійснює технологія туманних обчислень.

**Туманні обчислення** — це технологія, завдяки якій процеси зберігання та оброблення даних здійснюються у локальній мережі між кінцевим пристроєм ІоТ та хмарию. Її перевагами є: зняття навантаження зі хмари, передавання даних у режимі реального часу та додаткова безпека, а недоліком — зменшення надійності внаслідок децентралізації. Туманні обчислення застосовуються для зв'язку з пристроями ІоТ, при цьому дані передаються та аналізуються майже без затримок. Цю технологію може бути використано у будь-якій галузі: виробництво, охорона здоров'я, енергетика, фінансова сфера тощо. Проте, якщо час затримки є критичним у передаванні даних, то це завдання розв'яже технологія граничних обчислень.

**Граничні обчислення** — це технологія оброблення та зберігання даних на кінцевому пристрої ІоТ. Її перевагами є практично нульова затримка передавання даних, надійність та безпека, її може бути також використано у будь-якій сфері, особливо у пристроях ІоТ, якщо «розумне» обладнання не вимагає підключення до хмари для виконання розрахунків. Сфери

застосування технологій граничних та туманних обчислень багато в чому перетинаються, бо їх загальною перевагою є швидкість передавання та аналізу даних. Наразі з'явилося безліч прикладів реалізації IoT та граничних обчислень, наприклад, збирання показань лічильників, «розумні» автобусні зупинки, системи контролю водіїв громадського транспорту тощо.

Звичайно, у разі застосування мереж 5G та 6G туманні обчислення не зможуть витіснити хмарні технології в IoT. Ці напрями розвиватимуться та доповнюватимуть один одного. Але там, де потрібно розв'язання складних завдань керування та економіки, «хмара» залишиться у пріоритеті. А там, де потрібна значна швидкість рішень, отримають свій розвиток туманні та граничні обчислення і хмара використовуватиметься як сховище важливих даних.

Однак, поряд з сучасними тенденціями розвитку цих технологій, за умови майбутнього впровадження мереж 6G, вимальовується ще одна нова важлива тенденція — це конвергенція комунікацій, обчислень, позиціонування та виміру [7, 8]. Справа в тому, що наявні мережі мобільного зв'язку та 5G виконують фактично одну основну функцію щодо здійснення бездротового зв'язку. Мережі 6G одночасно виконуватимуть ще й функції обчислення, керування, позиціонування та вимірювання, що необхідно для таких застосунків як розширена реальність, підключена робототехніка та автономні системи.

У наступному розділі зупинимося ще на одній важливій обставині, яка з'явилася внаслідок впровадження IoT — виникненні ефекту великих даних (BD).

## **МЕРЕЖІ 5G, 6G та ВЕЛИКІ ДАНІ**

Соціально-економічний феномен BD є пов'язаним з появою технологічних можливостей аналізувати величезні потоки даних, що виникають у різних проблемних сферах, а також зі збільшенням усього світового обсягу даних. Це стало можливим завдяки упровадженню 2G–4G поколінь зв'язку.

Аналітики IBS Group Holding Ltd (РФ) весь світовий обсяг BD оцінюють у зетабайтах (1 зетабайт — 1012 гігабайтів) такими величинами [9]:

- 2015 р. понад 6,5 зетабайт;
- 2020 р. 40–44 зетабайт;
- 2025 р. до 500 зетабайт.

Водночас більшу частину даних генеруватимуть не IoT, а підприємства, тобто IIoT. У зв'язку з цим, через очікувані небачені обсяги інформації, навіть у разі незадовільного характеру поширення 5G у світі, вже у 2030 році намічається розпочати впровадження 6G. Розрахунки аналітиків показують, що мобільний зв'язок 5G, який охоплює традиційні частоти нижче 6 ГГц, та принципово нові частоти міліметрового діапазону 24–50 ГГц все одно не зможуть впоратися з передаванням та обробленням очікуваних величезних потоків даних. Тому нова технологія 6G повинна використовувати вже терагерцову смугу частот (100 ГГц) — 10 ТГц, за якої, на думку аналітиків, можна знайти вирішення зазначеної проблеми.

У разі використання мереж 5G для аналізу BD застосовують сукупність технологій, в основу яких покладено три операції [9]:

- оброблення великих, порівняно зі «стандартними» сценаріями, обсягів даних;

- оброблення даних, що швидко надходять у дуже великих обсягах, коли даних не просто багато, а їх постійно стає все більше;
- оброблення структурованих та неструктурованих даних паралельно, у різних аспектах.

Після виконання зазначених операцій можливо відновити ті закономірності в даних, які не є очевидними для обмеженого людського сприйняття. Це дає безпрецедентні можливості оптимізації багатьох сфер нашого життя: державного управління, медицини, фінансів, транспорту, виробництва тощо.

Не зупиняючись детально на принципах та тенденціях роботи з BD, все ж необхідно зазначити, що визначальними характеристиками для них є не тільки величезний масив, а й значний набір ознак. Останній характеризується показниками даних VVV (volume, velocity, variety), тобто фізичний обсяг, швидкість приросту та необхідність швидкого оброблення, а також можливістю одночасного аналізу даних різних типів. І це треба мати на увазі, перш ніж розпочинати їх аналіз.

Перелічимо найвідоміші методи аналізу BD.

**Машинне навчання ML** (Machine Learning) з учителем та без учителя. Після усунення у BD небажаних явищ (накопичення шуму, помилкової кореляції, пропусків даних) ML уможливлює ефективне оброблення BD відомими статистичними методами. Пояснюється це тим, що за великих обсягів вибірки стає справедливим висновок центральної теореми теорії ймовірності про нормальний закон розподілу даних. Ця унікальна властивість BD відкриває можливості для створення ефективних статистичних алгоритмів ідентифікації, розпізнавання образів тощо, що дає змогу виявити у даних неочевидні приховані закономірності.

**Методи класу Data Mining.** До них належить сукупність методів виявлення у BD раніше невідомих, нетривіальних, корисних практично знань, необхідних для прийняття рішень.

**Штучні нейронні мережі.** Метод охоплює мережевий аналіз, оптимізацію та генетичні алгоритми.

**Імітаційне моделювання.** Метод націлено на побудову моделей, які описують реальні процеси.

**Прогнозна аналітика, розпізнавання образів.** Метод здійснює візуалізацію аналітичних даних, інтеграцію, а також, просторовий аналіз даних.

До джерел BD належать:

- інтернет: блоги, соцмережі, сайти та різні форуми;
- корпоративна інформація: транзакції, архіви, бази даних;
- значення показання вимірювальних пристроїв: метеорологічних приладів, промислового устаткування, давачів стільникового зв'язку тощо.

Поза традиційної сфери бізнесу та маркетингу, технології BD застосовують в охороні здоров'я, для попередження природних та техногенних катастроф, у правоохоронних органах та військовій сфері.

Найістотнішою відмінністю оброблення та аналізу BD в мережах 5G та 6G стане різниця швидкості їхнього приймання та передавання. Для порівняння, зараз максимальна теоретична межа швидкості у мережі 5G проходить на рівні 20 Гбіт/с, тоді як у мережах 6G вона може досягати 1 Тбіт/с. Можна очікувати,

що ця обставина приведе до деяких змін алгоритмічного забезпечення зазначених методів аналізу BD, але ніяк не позначиться на їх суті.

І нарешті варто відзначити деякі ключові напрями технічного розвитку технології BD у мережах 6G [10,11]. До них, насамперед, належать такі тенденції.

- *Зростання обсягу переданих даних*, тому виникає потреба у більшому обсязі спектра. Пояснюється це тим, що багато сценаріїв використання мереж 6G, включно з такими застосунками, як розширена реальність (Extended Reality), та пристроями для безпосереднього обміну даними між комп'ютером і людським мозком (Wireless Brain — Computer Interactions) потребують у тисячу разів вищих швидкостей передавання даних, порівняно з 5G. Це зумовить освоєння вищих діапазонів частот аж до терагерцевих.
- *Перехід від оцінювання спектральної ефективності на одиницю площі до оцінювання обсягу простору та обліку енергоефективності*. Необхідність такого переходу викликано тим, що мережі 6G під час передавання та приймання BD працюватимуть у тривимірному просторі як з наземними, так і з повітряними пристроями (літальні апарати, дрони, прив'язані аеростати тощо).
- *Поява «розумних», випромінювальних BD поверхонь*. Це пов'язано з тим, що мережі 6G покладуть початок розвитку для передавання та приймання BD випромінювальних поверхонь, таких як стіни, дороги і навіть цілі будинки.
- *Масова доступність малих даних*. Як наслідок, мережі 6G забезпечуватимуть передавання як централізованих BD, так і величезної кількості розподілених малих даних, які будуть потрібні для надання нових послуг.

Слід відзначити, що BD є основою всіх інноваційних технологій. Тому шлях до створення алгоритмів AI починається з необхідної якості оброблення та аналізу BD. Давно зазначено, що в основі всіх невдач у створенні таких алгоритмів лежить низька якість даних, а не моделі. Враховуючи цей висновок, намагатимемося показати особливості зв'язку мереж 5G, 6G з AI.

## **МЕРЕЖІ 5G, 6G та ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ**

Поняття штучного інтелекту AI (Artificial Intelligence) як технології остаточно ще не сформовано. Вікіпедія наводить до шести його визначень, з них орієнтуватимемося на таке означення цього терміну [12].

**Штучний інтелект** — це здатність системи правильно інтерпретувати зовнішні дані, робити з них висновки та використовувати отримані знання для досягнення конкретної мети та виконання завдань за допомогою гнучкої адаптації.

З цього означення випливає, що проблематика AI повинна розвиватися в основному за трьома напрямками, пов'язаними з обробленням та аналізом BD.

І. Застосування машинного навчання (ML) та когнітивного аналізу. Слід зазначити, що цей напрям був центральним з самого початку розвитку технології AI.

II. Використання нейронних мереж, завдяки яким розв'язують нечіткі та складні проблеми, такі як розпізнавання геометричних фігур або кластеризація об'єктів.

III. Розроблення інтелектуальних роботів, здатних маніпулювати об'єктами, визначати місце свого розташування та планувати переміщення. Оскільки на виробництві людина часто працює разом з роботами, виникають проблеми її убезпечення. Зауважимо, що вже розробляють колаборативні роботи (Collaborative Robot), які контролюють стан людини та не допускають заподіяння їй шкоди або виконують певну роботу (побутовий робот-пилосос).

Методи AI застосовують у створенні таких технологій, як IoT та IIoT, розроблення інтелектуальних датчиків, аналіз природної мови, машинний зір, глибоке навчання, експертні системи, розпізнавання текстів та зображень, машинний переклад, бізнес-аналітика тощо.

Але поки що використання AI є обмеженим. Найкращі варіанти його використання на підприємствах займають діапазон від «автоматизованих агентів обслуговування клієнтів» до автоматизації інформаційних технологій, а в банківській сфері — до аналізу та розслідування випадків шахрайства.

На підставі викладеного можна зробити такі висновки. Технологія 5G розпочинає нову епоху розвитку напрямів та методів, основаних на AI, когнітивних міркуваннях, ML та глибокому навчанні з використанням BD. Впровадження AI у хмарні середовища базових мереж та периферію зробить доступною інформацію, яка інакше була б недосяжною.

Застосування передових хмарних технологій у мережах 5G надасть змогу за допомогою AI трансформувати структуру цих мереж. Природно, що перехід на «хмару» сприяє оперативності, гнучкості та масштабованості за умов зростання швидкості передавання та вимог до BD у мобільних мережах. Що стосується периферії (граничні та туманні обчислення), то в мережах 5G для них може бути забезпечено необхідну обчислювальну потужність. Зупинимось на цьому докладніше.

Вже зараз стала логічною поява гібриду AI та IoT, що отримав назву AIIoT [13]. Справа у тому, що при передаванні даних IoT-пристроями у централізоване сховище, наприклад таке як хмара, виникає проблема із затримкою у часі. Пояснюється це тим, що характеристика цього процесу часто не відповідає збільшенню даних. Якщо передавати дані необробленими, то затримка зросте і загальна продуктивність системи знизиться. Оброблення даних, а саме граничні та туманні обчислення, є однією з тих сфер, де AI може зробити значний внесок. Тому для реалізації нової технології AIIoT є необхідними компоненти AI, які можуть з цим завданням упоратися на периферії мережі. А периферією може бути все що завгодно — від бортових пристроїв транспортних засобів та літаків до заводів або, наприклад, газовидобувних установок, розташованих у віддалених районах. Інтелектуальне оброблення даних, що надходять від пристроїв IoT на периферії, спочатку передбачалося здійснювати у хмарі. Однак поступово від цієї концепції довелося відмовитися через великий обсяг даних, які передаються у зворотних напрямках, що призводило до неприпустимих затримок прийняття рішень та відповідної реакції. Вирішення цієї проблеми полягало в тому, що доцільним виявилось

здійснювати примежеві обчислення безпосередньо на краю мережі, визначаючи, які дані необхідно відправити у хмару, а які відфільтрувати. Тому під симбіозом, названим AIoT, слід мати на увазі AI-платформу (AI platform), розташовану на краю мережі.

Мабуть, основні тенденції розвитку AI в 5G збережуться й за появи мережі 6G. Однак уже зараз можна говорити про очевидний характер та деякі особливості впровадження 6G. Головними трендами, які ведуть до необхідності появи 6G, є небачене зростання кількості підключень технічних пристроїв та використання AI для безперебійного зв'язку з цими пристроями [3]. Націленість на таку інтеграцію AI з IoT не видається дивною, оскільки за оцінками аналітиків в 2030 році кількість підключених інтелектуальних технічних об'єктів на сьогодні оцінюються у 500 млрд., що значно перевищує населення Землі. Очікується, що широкого впровадження набудуть різні види «незвичайних» пристроїв, такі як, наприклад, окуляри доповненої реальності, гарнітури віртуальності, засоби відображення голограм тощо. Стає цілком реальним підключення до мережі автотранспорту, дронів, побутової техніки.

Важливого значення набуває концепція розумного міста, спрямована на ефективне керування сталим розвитком суспільства за умов урбанізації та поліпшення соціально-економічного і життєвого рівня своїх громадян [14]. Ефективне впровадження граничних обчислень і поєднання примежових технологій, таких як AI, IoT, безпілотники, переносні технології, віртуальна та доповнена реальність, можуть відігравати життєво важливу роль у реалізації рішень та сприяти еволюції розумних міст. Використання цих технологій стає невід'ємною частиною сучасних технологічних втручань для поліпшення міських процесів і виходить за рамки таких сфер, як керування, охорона здоров'я, транспорт, виробництво, сільське господарство та освіта. В їх основі лежать давачі та інші робочі пристрої, вбудовані в розумні системи, які використовують потенціал IoT та AI для сприйняття навколишнього середовища, забезпечують ефективне та автоматизоване прийняття рішень на основі отриманих BD з обмеженим втручанням людини. Однак, багато проблем, таких як безпека, конфіденційність, достовірність даних, централізація, масштабованість тощо, зберігаються. Згодом примежеві технології зможуть трансформуватися у кіберфізичні системи, здатні підключити фізичний світ до обчислювальних засобів для підтримання необхідних операцій у «розумному місті».

В осяжному майбутті неминуче об'єднання мереж 6G та AI. Водночас інтелектуальність стане невід'ємною характеристикою мережі 6G, тобто мова йде про так зване «інтелектуальне підключення». Воно буде одночасно відповідати двом вимогам: з одного боку, всі пов'язані та підключені один до одного пристрої 6G у самій мережі є інтелектуальними, з іншого боку, складна та величезна мережа сама потребує інтелектуального керування. Тому «інтелектуальне підключення» буде основною характеристикою, здійснюючи головну функцію мережі 6G — глибоке та повсюдне з'єднання з об'єктами.

Відзначимо, що за даними Міністерства науки та технологій Китаю швидкість передавання даних в мережі 6G, враховуючи терагерцовий

діапазон, буде у 8000 разів більше того, що може продемонструвати мережа 5G [15]. Це, звичайно, теоретичний результат, але навіть якщо мережа 6G працюватиме вдвічі повільніше, то її фантастична особливість надасть можливість «керувати пристроями з мозку». Можна припустити, що для повної реалізації такої можливості надзвичайно важливу роль відіграватиме й AI. Однак цей феномен може виникнути, мабуть, у неосяжному майбутньому.

Саме тому опис особливостей AI буде неповним, якщо дуже коротко не зупинитися на ще одній кінцевій меті з'єднання 5G + IoT + BD + AI. У цьому разі йдеться про інтелектуальне керування як можливий кінцевий результат будь-якої діяльності в усіх сферах.

Інтелектуальне керування є узагальненням семіотичного, когнітивного та інформаційного керування [16]. Необхідність інтелектуального керування найгостріше виникає для вирішення проблеми BD. Основою інтелектуального керування є інтелектуальні системи та інтелектуальні технології, які використовують методи та практики AI, в першу чергу ML. Оскільки для сучасного керування є притаманним приріст неструктурованої інформації, перед тим як узятися за основні функції керування, у будь-якому разі необхідно скористатися зазначеними методами аналізу BD. Без розв'язання цього завдання неможливо застосувати традиційні методи та деякі види інтелектуального керування, які полягають у побудові моделей стану того чи іншого об'єкта, які точно описують його поведінку. Тому від точності та швидкості аналізу BD залежить ефективність процесу створення моделі за допомогою процедури ML, яка по суті є найважливішою функцією AI. Зауважимо, що будь-яка модель інтелектуального керування є спрощеним описом стану та поведінки реального об'єкта. Ступінь спрощення може бути допустимим або створювати невизначеність [16], але це вже інше складне завдання, для розв'язання якого також є потрібним застосування спеціальних методів AI для побудови невизначених моделей. У цьому випадку можна вважати, що тенденції розвитку інтелектуального керування та AI за використання зв'язків 5G та 6G збігатимуться.

Однак слід все ж зупинитися на тому, що очікує нас невдовзі за широкого упровадження технологій 5G та 6G. Робота над стандартами мереж мобільного зв'язку 5G завершилася порівняно нещодавно. Більшість зон доступу 5G є або локальними, або зовсім тестовими, тому поява комерційних мереж поки ще дуже мало ймовірна. Очікуваний теоретичний максимум пропускної спроможності у цих мережах, відповідно до вимог стандарту IMT-2020 Міжнародного інституту електрозв'язку, може досягти 20 Гбіт/с до абонента та 10 Гбіт/с у протилежному напрямку, із затримкою зв'язку не менше 4 мс. Однак за оцінками фахівців бездротового зв'язку, затримка в 1 мс — це занадто багато для забезпечення необхідної швидкості реакції мережі, коли Великі дані стали рушієм функціонування бізнесу і суспільства.

Причиною неприпустимої затримки в мережі 5G є використання програмно-обумовленого інтерфейсу 5G NR, що призводить до значного уповільнення. Очікується, що виходом із такої ситуації буде створення технології зв'язку 6G, яка працюватиме у терагерцевому діапазоні з шириною

частотних смуг нового стандарту понад десятка ГГц, що уможливить забезпечення більшої пропускної здатності. Очікується, що, не зважаючи на те, що немає ще проєкту стандарту такого зв'язку, швидкість зв'язку 6G сягне 1 Тбіт/с, з мережевою затримкою до 1 мкс. Однак на шляху до терагерцевого діапазону необхідно подолати ще чимало технічних складнощів.

Значні зусилля у розвитку технологій IoT, AI та мереж зв'язку 5G, 6G здійснює Європейська комісія. Так, у 2018–2021 рр. виконується низка масштабних проєктів, в яких задіяно майже всі країни ЄС:

- **iDev40** (783163) — Інтегрований розвиток «Індустрія 4.0» в Європі для роботи зі складними цифрованими системами виробництва для досягнення високої якості продукції, малих термінів розроблення та виконання, з широким упровадженням систем керування даними та штучного інтелекту [17];
- **Productive4.0** (737459) — Електроніка та інформаційно-комунікаційні технології як засіб для цифрової промисловості та оптимізованого керування ланцюгами постачання, що охоплює весь життєвий цикл товару [18];
- **AFarCloud** (783221) — Розроблення розподіленої платформи для автономного ведення сільського господарства, що дасть змогу інтегруватися та співпрацювати кіберфізичним системам сільського господарства у режимі реального часу задля збільшення ефективності, продуктивності діяльності, покращення здоров'я тварин, якості їжі та зменшення витрат на робочу силу на фермах [19].

## ВИСНОВКИ

У статті в стислій формі розглянуто найголовніші особливості взаємозв'язку мереж 5G, 6G з інтернетом речей, великими даними та штучним інтелектом. Не зважаючи на те, що мережі 5G поки не розгорнуто повсюдно, основні особливості такого взаємозв'язку проглядаються досить чітко. Що стосується розвитку мереж 6G, ще не все зрозуміло, це в першу чергу стосується технічної реалізації зв'язку в терагерцевому діапазоні, тому про особливості взаємозв'язку в 6G можна говорити лише приблизно, пов'язуючи їх з тенденціями розвитку цього швидкого способу зв'язку.

Зазначено, що штучний інтелект (AI) може слугувати інструментом об'єднання інтернету речей (IoT) та великих даних (BD). Отже, вже зараз можна говорити про народження нової цифрової технології IoT + BD + AI, яка функціонуватиме в мережах зв'язку 5G та 6G. Розглянуті інструменти, особливо в мережі 6G, є здатними забезпечити неймовірну обчислювальну потужність як у хмарних, так і в граничних та туманних обчисленнях.

## ЛІТЕРАТУРА

1. 5G and the impact it will have on our global economy. URL: <https://bazisgroup.com/5g-and-the-impact-it-will-have-on-our-global-economy> (Дата звернення: 27.02.2021)
2. Гриценко В.І., Суровцев І.В., Бабак О.В. Система бездротового зв'язку 5G. *Cybernetics and computer engineering*. 2019. № 3 (197). 5–19. DOI: 10.15407/kvt197.03.005
3. 6G. The Next Hyper-Connected. Experience for All. URL: <https://cdn.codeground.org/nsr/downloads/researchareas/6G%20Vision.pdf> (Дата звернення: 15.02.2021)

4. IoT technology stack — from IoT devices, sensors, actuators and gateways to IoT platforms IoT. URL: <https://www.i-scoop.eu/internet-of-things-guide/iot-technology-stack-devices-gateways-platforms/> (Дата звернення: 27.02.2021)
5. Business guide to Industrial IoT (Industrial Internet of Things). URL: <https://www.i-scoop.eu/internet-of-things-guide/industrial-internet-things-iiot-saving-costs-innovation/> (Дата звернення: 14.03.2021)
6. Облачные, туманные и граничные вычисления: отличия и перспективы развития технологий. URL: <https://news.rambler.ru/other/42893517-oblachnye-tumannye-i-granichnye-vychisleniya-otlichiya-i-perspektivy-razvitiya-tehnologiy/> (Дата звернення: 14.03.2021)
7. Развитие сетей 5G в мире. URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Развитие\\_сетей\\_5G\\_в\\_мире](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Развитие_сетей_5G_в_мире) (Дата звернення: 25.02.2021)
8. 6G – шестое поколение мобильной связи. URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:6G\\_\(шестое\\_поколение\\_мобильной\\_связи\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:6G_(шестое_поколение_мобильной_связи)) (Дата звернення: 25.02.2021)
9. Big Data. URL: <https://www.it.ua/ru/knowledge-base/technology-innovation/big-data-bolshie-dannye> (Дата звернення: 14.03.2021)
10. W. Saad, M. Bennis and M. Chen, A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems, *IEEE Network*, vol. 34, no. 3, 134–142, May/June 2020, DOI: <https://doi.org/10.1109/MNET.001.1900287>
11. Y. Zhao, G. Yu, H. Xu. 6G Mobile Communication Network: Vision, Challenges and Key Technologies SCIENTIA SINICA Information. 2019. vol. 49. issue 8. P. 963–987 (in Chinese), DOI: <https://doi.org/10.1360/N112019-00033>
12. Искусственный интеллект. URL: <https://www.it.ua/ru/knowledge-base/technology-innovation/artificial-intelligence> (Дата звернення: 15.03.2021)
13. Бенджамин Джокела. Слияние искусственного интеллекта и «Интернета вещей». *Control Engineering Russia*. 2019. №2 (80). 70-72. URL: <https://controleng.ru/wp-content/uploads/8070.pdf> (Дата звернення: 25.02.2021)
14. Accelerating city transformation using frontier technologies. A U4SSC deliverable. URL: <https://www.itu.int/en/publications/Documents/tsb/2020-U4SSC-Deliverable-Accelerating-city-transformation/index.html> (Дата звернення: 15.03.2021)
15. Связь 6G окажется в 8000 раз быстрее 5G. iXBT.com. URL: <https://www.ixbt.com/news/2020/02/03/6g-8000-5g.html> (Дата звернення: 15.03.2021)
16. Розенберг И.Н. Интеллектуальное управление. *Современные технологии управления*. ISSN 2226-9339. 2017. №4 (76). URL: <https://sovman.ru/article/7608/> (Дата звернення: 15.03.2021)
17. <http://www.idev40.eu/> (Дата звернення: 17.03.2021)
18. <https://productive40.eu/> (Дата звернення: 17.03.2021)
19. <http://www.afarcloud.eu/> (Дата звернення: 17.03.2021)

Отримано 20.03.2021

## REFERENCES

1. 5G and the impact it will have on our global economy. URL: <https://bazisgroup.com/5g-and-the-impact-it-will-have-on-our-global-economy> (Last accessed: 27.02.2021)
2. Gritsenko V.I., Surovtsev I.V., Babak O.V. 5G wireless communication system. *Cybernetics and computer engineering*. 2019. № 3 (197). 5-19. DOI: 10.15407/kvt197.03.005 (in Ukrainian).
3. 6G. The Next Hyper-Connected. Experience for All. URL: <https://cdn.codeground.org/nsr/downloads/researchareas/6G%20Vision.pdf> (Last accessed: 15.02.2021)
4. IoT technology stack — from IoT devices, sensors, actuators and gateways to IoT platforms IoT. URL: <https://www.i-scoop.eu/internet-of-things-guide/iot-technology-stack-devices-gateways-platforms/> (Last accessed: 27.02.2021)
5. Business guide to Industrial IoT (Industrial Internet of Things). URL: <https://www.i-scoop.eu/internet-of-things-guide/industrial-internet-things-iiot-saving-costs-innovation/> (Last accessed: 14.03.2021)

6. Cloud, Fog and Edge Computing: Differences and Prospects for Technology Development. URL: <https://news.rambler.ru/other/42893517-oblachnye-tumannye-i-granichnye-vychisleniya-otlichiya-i-perspektivy-razvitiya-tehnologiy/> (Last accessed: 14.03.2021) (in Russian).
7. Development of 5G networks in the world. URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Развитие\\_сетей\\_5G\\_в\\_мире](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Развитие_сетей_5G_в_мире) (Last accessed: 25.02.2021) (in Russian).
8. 6G — the sixth generation of mobile communications. URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:6G\\_\(шестое\\_поколение\\_мобильной\\_связи\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:6G_(шестое_поколение_мобильной_связи)) (Last accessed: 25.02.2021) (in Russian).
9. Big Data. URL: <https://www.it.ua/ru/knowledge-base/technology-innovation/big-data-bolshie-dannye> (Last accessed: 14.03.2021)
10. W. Saad, M. Bennis and M. Chen, A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems, *IEEE Network*, vol. 34, no. 3, 134–142, May/June 2020, DOI: <https://doi.org/10.1109/MNET.001.1900287>
11. Y. Zhao, G. Yu, H. Xu. 6G Mobile Communication Network: Vision, Challenges and Key Technologies SCIENTIA SINICA Information, 2019, vol. 49, issue 8, 963–987 (in Chinese), DOI: <https://doi.org/10.1360/N112019-00033>
12. Artificial Intelligence. URL: <https://www.it.ua/ru/knowledge-base/technology-innovation/artificial-intelligence> (Last accessed: 15.03.2021) (in Russian).
13. Benjamin Jokela. Merging Artificial Intelligence and the Internet of Things. *Control Engineering Russia*. 2019, №2 (80), pp. 70–72. URL: <https://controleng.ru/wp-content/uploads/8070.pdf> (Last accessed: 25.02.2021) (in Russian).
14. Accelerating city transformation using frontier technologies. A U4SSC deliverable. URL: <https://www.itu.int/en/publications/Documents/tsb/2020-U4SSC-Deliverable-Accelerating-city-transformation/index.html> (Last accessed: 15.03.2021)
15. 6G will be 8000 times faster than 5G. iXBT.com. URL: <https://www.ixbt.com/news/2020/02/03/6g-8000-5g.html> (Last accessed: 15.03.2021) (in Russian).
16. Rozenberg I.N. Intelligent control. *Modern management technology*. ISSN 2226-9339. 2017, №4 (76). URL: <https://sovman.ru/article/7608/> (Last accessed: 15.03.2021) (in Russian).
17. <http://www.idev40.eu/> (Last accessed: 17.03.2021)
18. <https://productive40.eu/> (Last accessed: 17.03.2021)
19. <http://www.afarcloud.eu/> (Last accessed: 17.03.2021)

Received 20.03.2020

Gritsenko V.I., Corresponding Member of NAS of Ukraine,  
Director of International Research and Training  
Center for Information Technologies and Systems  
of the National Academy of Sciences of Ukraine  
and Ministry of Education and Science of Ukraine  
ORCID: 0000-0003-4813-6153  
e-mail: vig@irtc.org.ua

Babak O.V., PhD (Engineering),  
Senior Researcher of the Ecological Digital Systems Department  
ORCID: 0000-0002-7451-3314  
e-mail: dep175@irtc.org.ua

Surovtsev I.V., DSc (Engineering), Senior Researcher,  
Head of the Ecological Digital Systems Department  
ORCID: 0000-0003-1133-6207  
e-mail: dep175@irtc.org.ua, igorsur52@gmail.com  
International Research and Training Center for  
Information Technologies and Systems of the  
National Academy of Sciences of Ukraine  
and Ministry of Education and Science of Ukraine,  
40, Acad. Glushkov av., Kyiv, 03187, Ukraine

#### PECULIARITIES OF INTERCONNECTION 5G, 6G NETWORKS WITH BIG DATA, INTERNET OF THINGS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

**Introduction.** The 5G, 6G mobile technologies, which are actively developing in the world, and the Internet of Things, Big Data, artificial intelligence are closely intertwined. It is important to understand the features of the relationship to effectively use them in new intelligent information technologies.

**The purpose of the article** is to highlight the most important features of the relationship, which are viewed on the basis of experience in implementing 5G and 6G technologies.

**Results.** Internet of Things technologies use 5G, 6G, as well as cloud, fog, and edge computing to connect to high-speed devices. Machine learning methods, neural networks and simulation are used to analyze Big Data. Artificial intelligence algorithms are an integral part of all technologies, they allow you to intelligently connect and control 5G / 6G networks, the Internet of Things and Big Data. The main trends in the development of 5G / 6G will be the convergence of communications, the use of 3D networks, terahertz spectrum, quantum technology, artificial intelligence and deep learning.

**Conclusions.** The use of 5G and 6G high-speed networks, Internet of Things technologies, cloud computing, Big Data analysis and artificial intelligence is a prerequisite for the further development of the digital economy, production automation, smart healthcare and smart city.

**Keywords:** communication networks, Big Data, Internet of Things, artificial intelligence, machine learning.

---

DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt204.02.020>

UDC 004.9:911.5/9:528.94

**CHABANIUK V.S.**<sup>1,2</sup>, PhD (Phys.-Math.),

Senior Researcher of the Cartography Department, Institute of Geography,

Director of "Intelligence systems-GEO" LLC,

ORCID: 0000-0002-4731-7895

email: chab3@i.ua, chab@isgeo.kiev.ua

**KOLIMASOV I.M.**<sup>2</sup>,

Head of Production of "Intelligence systems-GEO" LLC,

ORCID: 0000-0002-4927-4200

email: kolimasov@ukr.net

**KRAKOVSKYI S.P.**<sup>1</sup>,

Junior Researcher of the Cartography Department, Institute of Geography,

ORCID: 0000-0001-5164-6272

email: krakovsp@gmail.com

<sup>1</sup> Institute of Geography, National Academy of Sciences of Ukraine

44, Volodymyrska str., Kyiv, 01054, Ukraine

<sup>2</sup> "Intelligence systems-GEO" LLC,

6/44, Mykylsko-Slobidska str., Kyiv, 02002, Ukraine

---

## **CRITICAL SYSTEMIC PROPERTIES OF ELECTRONIC ATLASES NEW GENERATION. PART 1: PROBLEM AND RESEARCH METHODS**

---

**Introduction.** *The revolutionary changes in information technology of the last two decades allow the construction of electronic atlases (EA), the capabilities of which are fundamentally richer than the capabilities of "classic" EA. This is achieved through the use of the systemic properties of the new generation of EA, which are therefore named systemic. Systemic EA remain the simplest and most effective spatial information models of territorial systems allowing applying them for the decision of many practical problems.*

**The purpose** of the paper is to formulate the need for systemic EA and describe methods for research their systemic properties. These methods will be used to find and describe critical systemic properties without which EA cannot be systemic. The methods are founded on Relational Cartography and Model-Based Engineering.

**Results.** *The evolution of "classic" EA is considered: from paper atlases and their images to analytical atlases. It is shown that on the imaginary border of classic and nonclassic EA there are already new generation of EA — systemic EA. Both the theory and practice of such systemic EA have many unresolved problems. Some of them are described in the article. The authors believe that many problems can be solved by implementing the critical systemic properties of EA. Two methods are used to research the problems and to prove the results: Conceptual frameworks and Solutions frameworks. Both the methods themselves and the possibility of their application to find the critical systemic properties of the new generation of EA are described.*

© CHABANIUK V.S., KOLIMASOV I.M., KRAKOVSKYI S.P., 2021

**Conclusions.** *The main problems of electronic atlases of the new generation are described and their solution is offered by a method of Conceptual frameworks and a method of Solutions framework.*

**Keywords:** *systemic electronic atlas, Conceptual framework, Solutions framework, critical system property.*

## **INTRODUCTION**

There are many theoretical arguments in favor of the need for this work. However, the decisive argument is practical. Namely, in 2020, more than twenty years after the release of our first electronic atlas (EA), it turned out quite unexpectedly that the differences in the understanding of “modern” EA (MEA) by developers with different qualifications (education) have become critical. Here we are talking about the developers, which may be divided into two (or four) groups in accordance with the professional education: cybernetists (programmers) and geographers (cartographers). Indicated differences are not a surprise, but it is surprising that the visions within the team, which has created several EA over the last twenty years, have become fundamentally different. Moreover, different visions have become not only the problems of individual members of the development team, but also the team as a whole — up to the impossibility of creating by such a team “desirable” resulting MEA or, rather, Systemic EA (SEA). This was the first “bell” that something is wrong.

The analysis of our practical atlas works of recent years, caused by this first bell, showed that, in addition to different viewpoints on individual components/elements of the MEA, there is another big problem common to all developers of all groups. This is the second, and the main, “bell” about the identified problems: different understanding or even misunderstanding of what the MEA is and what it is not. It turned out that this is a problem of modern atlas activity not only in Ukraine but all over the world. And it is both practical and theoretical. In our opinion, at the moment this understanding/misunderstanding can be reduced to answering the question: is the MEA a system or not. As shown below, the MEA is or can be a system and this problem can be solved by answering the following questions: 1) whether the MEA is a system and if it is so (the atlas in this case is called SEA), then 2) what exactly are the systemic properties of the SEA and, 3) which systemic properties of the SEA are critical, ie, those whose absence in the implementation of the SEA calls into question its “systemicity”. We decided that in order to overcome this misunderstanding, it is better to consider not all, but only three “critical” systemic properties of the SEA. Considering them will allow agreeing the different viewpoints on the SEA and it will be a simpler task than considering all the properties of the SEA.

EA is a kind of Atlas Information Systems (AtIS) according to [1]. A significant part of them are systems unambiguously and therefore are called “real systems” here. The rest of them can be called “simple systems”, although more usual are such names as “systematic collections of maps” or “systematized sets of maps”. AtIS, in turn, is a kind of Spatial Information Systems (SpIS) — a general class of systems we need in the study. The class of SpIS includes long-known “classic” EA, AtIS, Carto- and Geo- Information Systems (CIS and GIS). With the development of information technology and the transition of the Internet from the Web 1.0 to Web 2.0 epochs, many new SpIS have emerged that did not exist before

the Web 2.0 epoch. Perhaps the most well-known examples of such new SpIS are carto- and geo- platforms such as Google Maps and OpenStreetMap (OSM), respectively (Carto- and Geo- Information Platforms — CIP and GIP). The development of the Internet has influenced the classic SpIS. If we accept the almost indisputable opinion about the change of these SpIS in modern conditions, then the question arises as to the essence of these changes. Moreover, this issue is important both for existing EA that need to be upgraded and maintained in working state, and for new MEA/SEA that need to be created.

In the encyclopedic dictionary "system (from the greek: systema — a whole composed of parts; connection) is a set of elements that are in relations and links with each other, forming a certain integrity, unity" [2; p. 1215]. In the textbook [3; p. 185] the geographic atlas is called "a systematic collection of geographical maps, executed according to the general program as a holistic (integral) product. An atlas is not just a set of different maps, not a mechanical combination of them in the form of a book or album; it includes a system of maps that are organically interconnected and complementing each other, a system determined by the purpose of the atlas and the peculiarities of its use". From the viewpoint of the "systemicity" we need, it coincides with the definition of V. Vozenilek [4; p. 4]: "current" cartography understands "an atlas as a set of targeted compiled maps systematically organized according to the thematic content, the spatial extent and temporal viewpoint and assembled in a unified map language".

"Current" cartography is defined by the International Cartographic Association (ICA) as [5]: 1) cartography is the discipline dealing with the art, science and technology of making and using maps; 2) a map is a symbolized representation of geographical reality, representing selected features or characteristics, resulting from the creative effort of its author's execution of choices, and is designed for use when spatial relationships are of primary relevance; 3) a cartographer is a person who engages in cartography. All cartographies, the subject of which is the study of the map, we call "classic". Hence the term "classic" cartographer, although we also define this concept directly.

In K. Salishchev's definition, the significance of the first of the two components of his "system of maps" — maps (elements) — is generally clear. This is because they are discussed in detail, for example, in his own textbook [3]. The second defining component of the system — relations and links — does not clarified by K. Salishchev's definition and so far no work has been found where this clarification could be found. Indeed, questions arise immediately after trying to understand the essence of the used terms "collection", "set" and "system of maps". "Collection" is "an assembly of collected (things, works, etc.), gathering " [6; vol. 2; p. 344]. "A set is an assembly, a selection of subjects of one purpose, forming something whole, eg, a set of tools" [2; p. 858]. As of 2020-oct-10, Google Translate offered "set" as the most common English translation of the term "assembly" («набір» in Ukrainian). We always translate the last term into Ukrainian as "set" («множина» in Ukrainian). Therefore, if we do not clarify the meaning of the term "system of maps", then, according to K. Salishchev, atlases can be called sets of maps with some "systematic" or "systematized" properties received in the process of its "collecting".

Further in K. Salishchev's definition it is said that the atlas is not a mechanical set of maps, but "a system of maps that are organically interconnected and complementing each other". That is, K. Salishchev identified two types of relations between two or more atlas maps: interconnectivity and complementarity. In

contrast to the well-researched concept of a map, these relations (and/or links) between maps are poorly understood. Previously, we "hid" the problem of "unstudied" relations by defining an atlas of the classic type. For this, K. Salishchev's definition was supplemented by the sentence "..., created by specialists with classic cartographic knowledge for users who may not have this knowledge" [7; p. 47]. The amount of knowledge of specialists with "classic" cartographic knowledge corresponds, at least, to a textbook on cartography, for example, [3]. Thus, we hid the second component of atlases as systems in the "classic" knowledge of professional cartographers, who should know what the "interconnectivity and complementarity" of the paper atlas system of maps is. Due to the modern problem of misunderstanding the essence of modern EA (MEA), we can no longer "hide" the relations of the "system of maps" in the knowledge of classic cartographers (geographers). That is, if we return to the term "system of maps" by K. Salishchev, we have to admit that this term is defined as vaguely as "systematic collection of maps" and "systematized set of maps".

Note that the first mention of projects to create Electronic Atlases (EA) dates back to the 80<sup>s</sup> of last century [8]. Unlike paper (analogue) media, at that time there were no cost-effective electronic means of disseminating EA or their results, and EA in one way or another does not involve individual use. Due to technological limitations, all atlas implementations in the 80<sup>s</sup> of the last century should be considered if not purely research, but experimental. This view contradicts the one formed by many reviews of this issue. However, the technological context was the "pusher" of the development of EA throughout the period of their existence, so we decided to draw the reader's attention to this issue. At the same time, we are primarily interested in the practical use of EA, which involves not individual but mass use.

EA for mass use began to be created in the 90<sup>s</sup> of the last century, when there were technological prerequisites for this. These were primarily optical media (first CD and then DVD), which quickly became cheap and could store enough information for EA. The second technological prerequisite for EA was the development of personal computers. After all, for example, workstations used in the prototype of the Atlas of Canada [8] could not be used effectively not only by end users but also by developers of atlas maps.

Initially, in the 1990<sup>s</sup>, most EA were electronic counterparts of paper atlases (PA). And the latter were defined similarly to the definition from [3]. It is better to call such EA not a system, but a systematic collection of maps, a systematized set of maps or EA only for reading (hereinafter RO — Read Only, [9]). Around the turn of the millennium, two more classes of EA emerged: Interactive Atlases (IA) and Analytical Atlases (AA) [9]. Kraak and Ormeling [8] believe that AA is either AtIS or even GIS, so a relatively new class of EA can only be considered IA as a subset of AtIS. We can assume that there are some analytical EA (AtIS) that do not belong to IA class in the usual sense, but they are not sufficiently defined. Next we want to dwell on the crisis of atlas cartography, which manifested itself at the turn of the first and second decades of the 21<sup>st</sup> century.

In the first decade of the current century, we created several EA, and completed it with Electronic versions of the National Atlas of Ukraine (EINAU) in 2007 (version 1.0) and in 2010 (version 1.1). The development teams of these EA consisted of cybernetists (programmers) and geographers (cartographers),

who solved their relatively independent professional tasks. If we use the terminology of the Conceptual Framework of Relational Cartography described below [7], we can say that cybernetists (programmers) dealt with the datologies or technological context of maps and EA in general, and geographers (cartographers) dealt with infologies or business (language) context of EA maps. Then the integration into one system of relatively independent datologies and infologies was possible and this was done by cybernetists (programmers). All these EA were produced on optical media and did not allow any changes by end users. This condition has even been included in atlas license agreements. Later we called them EA of the classic static type [7]. Also, these EA are called atlases of the Web 1.0 epoch.

Interestingly, among the EA of the classic static type created by us were both RO and IA atlases. And even more interestingly, Web 1.0 is also called "Read Only Web" [10]. If we analyze the paradigms of classic cartography, it is possible to notice that from the infological viewpoint the practically applicable paradigm of atlas cartography can be called only the cognitive/communicative paradigms, which in the current millennium has become a geovisualization. According to these paradigms, the map is an image, not a model or idea [11]. These paradigms coincide with the cognitive and communicative conceptions of cartography arising from work and figure [12; Fig. 3] of A. Berlyant, if we take into account that the model and language conceptions of cartography shown there did not develop in the 21<sup>st</sup> century. And if we turn to our practice again, it turns out that the dominant conceptions of atlas cartography in Ukraine is a subset of cognitive/communicative conceptions — cartography of K. Salishchev, and hence all his approaches, some of which are described above. In other words, electronic atlases of RO and IA classes are not infologically different from each other — they all correspond to the cognitive/communicative paradigms/conceptions of cartography. There are only datological or technological differences that do not change the "representativeness" of the models of both atlas maps and EA in general.

R. Roth in his doctoral dissertation [13] pointed out that cartography is in another crisis, which we called the 2010 crisis of classic cartography [7]. In addition, at the turn of the first and second decades of this century, the cartographic knowledge of cybernetists (programmers) changed, which influenced the understanding of the MEA. Cybernetists had to "accept" the fundamental changes in cartographic IT that led to the change from the Web 1.0 epoch to the Web 2.0 epoch. The new class of SpIS is emerged. OSM is just one of many examples of such new systems. The change of the Web epoch has definitely affected atlas activity. It exacerbated the "2010 problem of atlas cartography", which is a consequence of the 2010 crisis of classic cartography and the change of the epochs from Web 1.0 to 2.0. At the same time, classic geographers (cartographers) have not changed their opinion about the MEA, which boils down to the fact that it is ultimately an analogue of the corresponding paper atlas. This is evidenced, in particular, by their "wary" attitude to or even misunderstanding of the essence of new cartographic phenomena, which are denoted by the terms "web cartography 2.0", "neocartography", "neogeography" and others (see reviews of this issue in [10] and [7]).

The Web 2.0 epoch is compactly and, most importantly, most clearly defined by Tim O'Reilly: "Web 2.0 is a business revolution in the computer industry caused by the transition to the Internet as a platform, and an attempt to understand the rules

of success in this new platform. The key to these rules is to create applications that use network effects to get better the more people use them. (This is what I have elsewhere called 'use of collective intelligence')" (cited from [10]). Simply put, Web 2.0 is a platform and a collective intelligence.

In modern atlas activity it is no longer possible to neglect carto- and/or geo-platforms. At the same time, "collective atlas intelligence" does not yet exist, so MEA/CEA in general have not yet reached the Web 2.0 epoch. Despite the practical need to use platforms in atlas, this issue is still little studied theoretically. This is largely why we introduced the concept of the intermediate "Formation" of EA evolution, which is "somewhere between" the Web 1.0 and 2.0 epochs. This Formation is called Web 1.0x1.0 or Web 1.0<sup>2</sup>. Such a record means that carto-/geo- platforms must be used and, assuming that there are several repeating components in the MEA/SEA, at least one such component must be changed online. Since this dynamics, as well as statics, should be provided by professionally trained specialists in cartography (geography) of the modern generation, it is advisable to define such MEA/SEA as atlases of the classic dynamic (variable) type.

To limit the range of research issues, we will use our practice. All Atlas systems (AtS), created by us for the years from 2000 to 2015, belong to the classic static type. This is about 20 specific systems, which are denoted as CAtS of the static type, where C = Classic, AtS = EA $\cup$ AtIS. CAtS of the static type are considered in detail in the monograph [7]. It is important for this work that all specific instances of the CAtS of the static type class had two important characteristics:

1. Each certain atlas solution consisted of nine repeatable components: 1) user interface, 2) contents tree, 3) base map, 4) thematic map layers, 5) cartographic component, 6) non-cartographic content, 7) search, 8) view, 9) architecture.

2. All specific AtS were built using an atlas model called the Atlas Solutions Framework AtlasSF1.0. AtlasSF1.0 is an epistemologically higher organized model/system in relation to each specific instance of the CAtS of the static type class.

AtlasSF1.0 is the result of the experience of multiple creation of specific instances of CAtS static type. Three editions of AtlasSF1.0(n),  $n = 1, 2, 3$  were created, each of which was used for approximately five years during 2000–2015. In the monograph [7] CAtS of the static type is referred to the Web 1.0 Formation. Our practice confirms that the presence and understanding of the critical properties of AtS have sharpened with the change of the Formation. Currently created (and this is 2020) specific copies of CAtS should belong to the dynamic type class. At the same time, CAtS of the static type are still being created in parallel.

**The purpose** of the paper is to formulate the need for systemic EA and describe methods for research their systemic properties. These methods will be used to find and describe critical systemic properties without which EA cannot be systemic. The methods are founded on Relational Cartography and Model-Based Engineering.

## **PROBLEMS. EVOLUTION OF EA AND NEED FOR SYSTEMIC EA**

In addition to the problems described in the Introduction, we could refer to the recent summary of the report by Rene Sieber and Eric Losang, the current chairman and deputy chairman of the ICA Atlas commission, and close the theme

of current atlas problems. Namely: "After decades of prosperity, atlas producers are faced with a serious number of challenges. Those challenges are both external and internal, either due to shifted external conditions or because of internal shortcomings. *Internal challenges* include, inter alia, the missing Web presence and PR, traditional atlas concepts, static GUI design, an overload of atlas features, default atlas contents, and repetitive visualization, whereas *external influences*, such as user behaviour, technological advancement and content that reflects new ideas and methods intensify these challenges. Three provocative statements — 1) atlases as mere collections of maps, 2) atlases rely on old-fashioned concepts, and 3) atlas map design is unattractive — are then picked in order to demonstrate possible approaches in rejuvenating atlas concepts" [14].

Despite our agreement with this summary, it should be borne in mind that: 1) we target a wider audience than EA developers who understand the summary; 2) the report itself is not yet available, so we consider it permissible to present our point of view on some of the problems formulated in the summary, as well as on other related problems.

Recently, unfortunately only in theses, V. Vozenilek [15] suggested that the atlas can be a real system in our terminology: "a system universum A involves maps, symbols, map elements, graphs, texts, etc. and a system characteristics R involves all relation between them". This definition corresponds to our understanding of the concept of a spatial system, except that the elements of the system are maps, not their components.

It is important to note that V. Vozenilek had to introduce the concept of "systematic" cartography, which is exactly not classic. We cannot guess what V. Vozenilek actually meant, but we will point to another important for us statement from [15]: "If an atlas is a system according to the theory of systems it make us possible to measure 'a rate of systematization', and make atlas taxonomy better. It will also provide a view into an atlas structure and tools for its improving". This statement corresponds to our understanding of "atlas systemicity". In the Introduction we have already used the range "simple systems" — "real systems". According to V. Vozenilek's quotation, there are ranked systems between simple and real systems.

Here it is advisable to pay attention to the "future" definitions of cartography, map and cartographer. At the moment they are designed and developed by the ICA Working Group "Cartographic Body of Knowledge" [5]: 1) cartography is the science, technology and art of cartographic mapping and using maps; 2) cartographic mapping is mapping a set of spatially related data, while preserving spatial arrangements and simplifying detail; 3) a map is a medium designed for communication of generalized spatial information and relationships; 4) a cartographer is a person involved in cartography. From these definitions it is possible to conclude influence of geovisualization paradigm of cartography, which does not go beyond classic cartography. There isn't influence of "systematic" cartography or any other non-classic paradigms. That is, classic cartographers want to stay within the limits of classic cartography. We do not criticize this paradigm, although we are interested to see how it will help cartography emerge from the obvious crisis.

**Evolution of EA.** The work considers the problems that are on (belong to) the conditional "evolutionary" boundary of classic and non-classic atlas cartography. Moreover, the latter concept cannot yet be clearly defined. Here, the term "classic

atlas" cartography means the same as "classic" cartography, which is used in the creation of atlases. Because of this, classic atlas cartography for a particular atlas depends on the professional skills of the development team. We recommend to start reviewing the concepts of non-classic cartography such as "Web Cartography 2.0" or "Neocartography" from the work [10], where these concepts are related to the Internet epoch, called Web 2.0. The Web 1.0 and Web 2.0 epochs are agreed with the EA evolution Formations. To more adequately characterize the level of EA evolution, we introduced Web 1.0x1.0 Formation "between" Web 1.0 and 2.0 Formations, which is sometimes also referred to as Web 1.0<sup>2</sup> [7]. Web 1.0x1.0 is currently the most relevant for SEA, as EA in general has not yet reached the Web 2.0 Formation. In the Web 1.0x1.0 Formation, EA of the classic dynamic type (or SEA) must be created to replace the EA of the classic static type. The latter were created in Web 1.0 Formation and included all the classic EA.

Given the uncertainty of non-classic atlas cartographies, we decided to use a somewhat unusual description of the problem. Namely, according to the classification [9] EA is divided into three classes that can correspond to successive stages of their evolution: from atlases only for reading (RO) through interactive atlases (IA) to analytical atlases (AA). The set of all EA can be ordered by their properties and/or capabilities so that  $RO \subset IA \subset AA$ . The simplest are RO atlases, the most complex are AA. Atlases of RO, IA classes are (mostly) classic, and among atlases of AA class are non-classic. Both the AA class itself and some of its non-classic instances have been the least studied, which is the main problem.

Moreover, it is possible to make many arguments in favor of the fact that AA should have a subclass of non-classic atlases, which we call Systemic. Systemic EA can be called the next generation of atlases and prove that  $AA \subset SEA$  (although it may be  $SEA \subset AA$ ). However, we will not do this due to the lack of certainty of both AA and SEA. Thus, the main problem of the work is the concept of SEA as a AA subclass or as a class following AA or a more general superclass than AA. The SEA class is identified by properties called critical. Criticality of a property means that in the absence of such a property, a particular atlas will not be systemic. Part 2 of the paper considers only three critical system properties (CSP): 1) atlas as a system (CSP.System), 2) contents tree as the main means of classifying the subject area (CSP.Tree), 3) perception of the interactivity of atlas maps from a systemic point of view (CSP.View).

From the beginning one of the most well-known classifications from [9] is used. There (p. 168), as well as in other sources [8; p. 161], three classes are identified that correspond to successive stages of EA evolution: "Electronic atlases can be classified according to several principles, in particular, according to their specific spatial-thematic features (content of the relevant atlas and space), intended for use and users and, finally, technical characteristics .... Because the first criterion is essentially related to the thematic area, the fundamental classification that is taken into account concerns the use, the users or, more precisely, the degree of freedom given to them. All authors agree on the distinction between the three types of atlases according to the levels of freedom and, consequently, interactivity: *atlases for viewing only (or atlases for reading only)*, *interactive atlases* and *analytical atlases*" [9; Fig. 3.3].

Atlases from AA class, in contrast to RO atlases and, in part, IA atlases, raise several controversial issues. Firstly, Kraak and Ormeling [8; p. 161] agree with such definition of EA analytical class: "An electronic atlas is a computerized GIS, related

to a certain area or theme in connection with a given purpose, with an additional narrative faculty in which maps play a dominant role'. As these electronic atlases tend to become more complex the term 'atlas information system' can also be used for them". At the same time Kraak and Ormeling [8; p. 17] argue that (all) EA are also called atlas information systems (AtIS) and "their function is less one of information processing than of answering specific questions, providing the support to integrate the answers in the mental map of the atlas user. This requires specific scenarios for a gradual immersion of the user into the new information environment. These AtIS can be extended to contain drawings, photographs, text and sound, and so become multimedia systems".

Secondly, it is necessary to pay attention to the short paragraph ([16; p. 60–61] 4.9.2 CIS: Cartographic Information System — a (Short) Episode (?)), where the authors argue that at the turn of the 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> millennia "perhaps the whole epistemological genesis of cartography would change in the coming years if the cartographic community placed more emphasis on CIS instead of GIS and on end products, i.e. on maps, than on databases and methodologies behind them, that is, on the architecture of the system. However, in particular, in the Anglo-American world, at this time the wonder of GIS exceeded the importance of the end result — geovisualization. Thus, a strange situation has arisen (which cannot be imagined in other disciplines or sciences, such as medicine), that terminology, technology and methods have excluded the actual goal or 'desired object', the map".

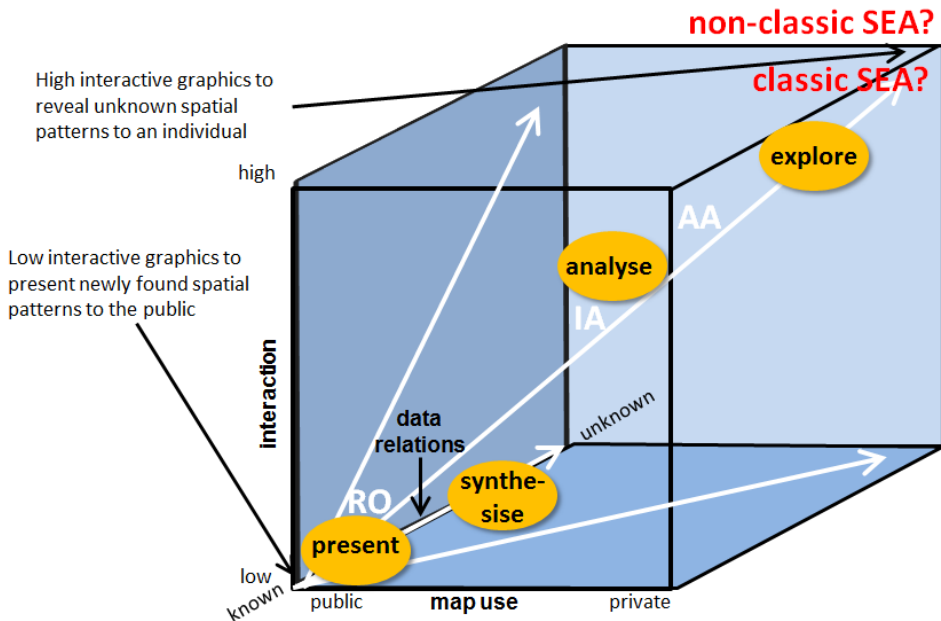
It will be recalled that both EA and AtIS are first and foremost CIS and only secondarily GIS at least because  $EA \subset AtIS \subset CIS \subset GIS$  according to their "classic" definitions. However, these classic definitions need not only to be updated, but also to be rethought through the needs of modern theory and practice. Moreover, many questions need to be answered, starting with the modern definition of GIS, adequate assessment of GIS-hegemony by ESRI, Inc., as well as GIScience in general.

We tried to update [9; Fig. 3.3] for the needs of this work. However, we did not succeed, because in this case we would have to show in addition to the two-dimensional figure the third or even fourth dimensions. Therefore, we concentrate only some facts that would be desirable to show in the updated figure. Namely, on the two-dimensional [9; Fig. 3.3]:  $EA \subset IA \subset AtIS (= EA, [1])$ ,  $EA (= AA) = AtIS$  [8; p. 17],  $AA \subset GIS$  [8; p. 161],  $EA \subset AA$ . The three (four) dimensional figure should show interactive SEA (ISEA), analytical SEA (ASEA), and SEA with their epistemological and evolutionary relations. Several attempts to show such three- and four-dimensionality were made in the monograph [7; Fig. 0-2, Fig. 7-1], although for SpIS, more general than EA.

We can say that the main problem is the initial characterization of a class of SEA, the elements of which according to the classification [9; Fig. 3.3] should belong to the class: 1) interactive EA and 2) analytical EA, or 2) followers of analytical EA. This is not AtIS or GIS in the "classic" sense. This is a fundamentally new class of EA, which should be created using not only classic cartography, but also a new, systemic (or systematic, see [15]) cartography. The systemic cartography should be a two-dimensional science, where the first dimension is maps and, accordingly, some Subject cartography, and the second dimension is the relations between maps and map systems and, accordingly, some Relational cartography.

In Chapter 9 of [8] there is a description of those shown in [9; Fig. 3.3] RO, IA, AA and other components of the EA evolution. However, we use only Fig. 1.2 from Chapter 1 of [8]. We changed this figure to suit our needs (Fig. 1): 1) [9; Fig. 3.3] and [8; Fig. 1.2] are combined, 2) it is shown the classes of "classic" and "non-classic" SEA, which are studied in our work.

In the discussion of the map use cube [8; Fig. 1.2] Kraak and Ormeling said that "... recent developments in cartography and other disciplines handling geo-spatial data not only require a new line of thought, but also create one. This can be illustrated by plotting the evolutionary stages of the development of electronic atlases in the cube along the diagonal from the corner 'wide audience, presenting knowns and low interaction' towards the corner 'private use, presenting unknowns and high interaction'".



**Fig. 1.** Map use cube: a) four main situations of data visualization, b) the evolution of electronic atlases since 1987 according to [8; Fig. 1.2], c) RO, IA, AA location, d) classic and non-classic SEA. Color version of this and other figures can be seen on the site of journal.

**On way to EA systemic properties. Need for Systemic EA.** The need for Systemic EA follows from their known usage. Now we are not worried about the reasons why this or that usage happened. We pay attention only to the fact that all the given examples describe integrated systems of at least two hierarchical in some sense strata of components. The "lower" is the stratum on which the classic EA "exist". The "higher" stratum is a metastratum of the lower. For Atlases of the Web 1.0 Formation, these strata are called Operational (lower) and Application (higher).

The most obvious are the integrated systems of atlases, created with the help of atlas platforms (AtP) (sometimes "atlas frameworks"), and AtP themselves. AtP can be an explicit or implicit constituent of an integrated system. The term "platform" means "a system that can be reprogrammed and customized by external developers/users, thus adapting it to an infinite number of needs and niches that the developers of the platform itself could not even anticipate, and all it is also much less time consuming" [17]. The integration of the components of such two adjacent strata can be "weak" (implicit) or "strong" (explicit). Much is said about this in the monograph [7]. Note that with the evolution of EA, strong integration is increasingly taking place.

May be firstly the concept of "platform" ("framework") in the atlas context has been used by representatives of the cybercartographic paradigm of cartography. In 2005, Pulsifer and Taylor [18] used the term "Open Cartographic Framework (OCF)" to denote a three-tier architecture that embodies the authors' "A Mediator Based Development Model". OCF was the basis of the Cybercartographic Atlas of Antarctica. The system architecture was based on the modular principle, much attention was paid to the semantic atlas model. It is named the starting point in the development of atlases [19] and involves the implementation of certain information architecture (hierarchical (tree), matrix, linear etc.) and information navigation models, which should ensure the movement of the end user between the elements of the information architecture.

The main practical result of cybercartographers is the Nunaliit Cybercartographic Atlas Framework [20], which "is an interactive data management platform for collecting, comparing, presenting and storing information and its context with a special emphasis on the use of maps as a unifying framework. Nunaliit is a central part of cybercartographic technologies. It began as an experiment in telling compelling stories using interactive maps and has evolved into a fairly flexible data management system with the ability to link information and present narratives that place information in context. It is able to interact with information through maps, graphs, timelines and other expressions, combining text, audio, video and photos. At the Geomatics and Cartographic Research Center (GCRC), this is commonly referred to as atlas deployment" [21; p. 129]. Thus, with the help of Nunaliit created Cybercartographic Atlas of Antarctica, Atlas of the Languages of Iran, Atlas of Ontario Neuroscience and many others. Most of these atlases are very simple to make, often devoid of contents trees, and contain many other shortcomings that are unacceptable to classic cartographers. However, this is the first AtP that is publicly available and allows any user (who has certain programming and/or mapping skills) to create their own atlases.

Of the theoretical works of cybercartographers, the most interesting are the works of representatives of the "Mexican branch" from CentroGeo. Thus, in [22; p. 77] the

following important thoughts are voiced: "Cybercartographic atlases are multidimensional systems that consist of three axes: models, representation of knowledge and communication. Conceptually, applications can be approached systematically from each of these perspectives. For example, a cybercartographic atlas can be considered as a model of models or a geospatial metamodel" and "A cybercartographic atlas is a model of models. Each of the models aims to represent the geographical landscape in one way or another" (ib.; p. 79). Atlases are not only identified with maps or the transmission of information through maps. Cyberatlas can contain cartographic digital models, virtual maps, digital terrain models, space maps, relational databases, topological data structures, raster models, geotextile models, iconic models (photographs, videos, images), music models, landscape ecology models and geographical business models [22].

Subsequently, the team of scientists from CentroGeo focused on developing their own paradigm at the intersection of cybernetics and geomatics — geocybernetics [23]. Geocybernetics is an interdisciplinary field of research in which cartography, GIS, remote sensing and the disciplines that make up its main cognitive framework interact and intersect: cybernetics, theories of complexity and chaos, and geocomputing [24]. The leading directions of geocybernetics research are (1) cybercartography, (2) complex solutions in geomatics, (3) collective mental maps [34], to which were later added (4) the geomatics prototype, (5) the Strabo technique and (6) the Reyes method [24]. Priority for the direction is the ability to address social needs, as evidenced by CentroGeo's experience in implementing more than 60 projects [25], including six cyberatlases in 1999–2000 [24]. The role of visual language in geocybernetics is performed by cybercartography, which "uses metalanguage: a comprehensive language formed by various other languages. When developing a cybercartographic atlas, the language that most effectively expresses a process, concept, or problem is chosen and used to generate messages that are transmitted over various media. However, the main elements of this metalanguage, which includes formal codes, semantics and syntax, have yet to be developed [26]. Cybercartography, whose main theoretical building blocks are cybernetics, general systems theory and modeling [23], is considered only a subset of geocybernetics, which has led to discussions with cybercartographers [25].

Cybercartographic school pays special attention to atlases, created the AtP, which contains knowledge designed for mutual exchange with users, and attempts to solve theoretical problems of cartography of the Web 2.0 epoch (non-classic cartography). But most cybercartographers are concerned with the communication aspects and ideas of critical geography, for which cyberatlas is "primarily a social product developed by teamwork in the societies for which it is intended; it is interactive both socially and technically" [9, p. 175].

The elements of AtP were actually created in the draft Electronic version of the National atlas of the Netherlands (EINAN), which was in the active phase in 2008–2013. The concept of the atlas positioned EINAN as a metaphor of NSDI of the Netherlands. The conceptual structure of EINAN was presented in article [27]. Its review and comparison with EINAU were made in [7], which established the similarity of these solutions in the technological context. The conceptual structure of EINAN coincides with the Conceptual Framework of EINAU.

We pay special attention to the Switzerland atlas "scientific school". After all, Atlas of Switzerland (AoS) is a kind of atlas "standard", and all its versions are interesting, starting with the first disk version in 2000 [28] and ending with the online version in 2016 [29]. However, in addition to specific products such as AoS versions, we should not forget about SAP — Switzerland Atlas Platform [30]. Items like the SAP are the result of repeated practice. In addition, it is quite obvious that these subjects contain much more knowledge than each specific application of SAP.

Implementation of AoS Online [31] raises several questions, because in our opinion it is impeccable in terms of critical system properties of CSP.System, CSP.Tree and CSP.View. For example, the contents tree of this atlas makes it impossible to view all sections and maps of each section at once. For a comprehensive study of the structure of the atlas, you need to select a specific section and move in successive iterations to the required sections/maps. It is important to add that when choosing a particular section/subdivision, we are not offered categories following the hierarchy, but random (popular or newest) maps from any subdivision. This approach significantly complicates the understanding of the studied system structure, as well as atlas navigation.

Interactive capabilities (CSP.View.Interactivity) of AoS Online are quite limited compared to previous versions. In particular, the "smart legend" of maps [32], which provided the variability of the legend and signatures by the user, and was considered a central element of the concept of "smart maps" (intelligent maps) of the atlas. It will also be difficult for the average user to explain the presence of the word "online" in the name, as this version has a very "thick" client (which is even more demanding to characteristics of PCs) and is not available on mobile devices.

Another product of SAP is the Hydrological Atlas of Switzerland (HADES). It is important to note that the implementation of HADES has departed from the concept of a user interface dominated by the map. This atlas solution is rather a website and conditionally combines an atlas as an encyclopedia with textual and graphic materials, and an atlas as a cartographic product. Although HADES, as a separate instance of SAP, uses many open solutions, SAP involves the use of technologies that will be difficult to reproduce for less well-off development teams. So far, SAP cannot be an open platform that would allow the creation of atlas products for other countries and regions. Last but not least, this is due to its own base map, which was created by the Swiss Topographic Service.

Influenced by the ideas of cybercartographers was [33], comparing AtIS with the "cartographic geo-communication platform". However, given the implementation of ÖROK Atlas Online, preference was given only to communication aspects, and the platform did not seem to be created. Later, other representatives of the Vienna University of Technology participated in the creation of two related atlas solutions, namely genderATlas [34] 2013–2015 and genderATlas für die Schule [35] 2016. The latter even took first place at the International Cartographic Exhibition in 2017 at the 28<sup>th</sup> International Cartographic Conference in Washington. The presented atlas is created on a modular principle and it is possible to see that each element of a separate map (cartographic component, legend, search) is an instance of the corresponding module of the atlas. Although atlases contain a contents trees, it is not possible

to talk about the close relations of maps, which would allow comparison and search for relations, especially those that go beyond the study subject of the atlas. The lack of systemic properties of EA should probably be related to the authors' understanding of the atlas as a collection of maps that consistently reveal a certain theme.

The atlas is not seen as a holistic model, but as a tool for visualizing individual layers of data: "Gender atlas is a tool that can be used to visualize gender data at different scales, and thus make them available to the general public" [50; p. 338]. But it is important for us to establish whether the AtS was created or a solution that provides for multiple use or at least facilitates the development of future atlases. After analyzing the AtS and their description in the work [36], we concluded that we need to talk only about the quality and flexible modular architecture of genderATlas, which allowed the authors to expand it to genderATlas for the school. Representatives of the Vienna University of Technology paid more attention to the creation of a specific atlas than to a specific atlas infrastructure. However, it should be noted that supporting and updating genderATlas was a priority. And the use of open solutions, in particular leaflet.js, D3.js, Bootstrap and others, are allowing to expect long-term operation of this AtS.

"GenderATlas interactive capabilities mean that users can modify existing maps to suit their needs to make them suitable for use according to their specific requirements — for example, by scaling or selecting access to additional information and data" [36; p. 331]. In fact, the atlas cannot be attributed to a AtS with a high interactivity. Legend settings (color change, classification method), object selection, as well as any analytical functions, including access to the data table, which are important for the "data visualization tool", are not implemented. If ÖROK Atlas Online at least contains a static topographic BM (Base Map, contour map with signatures here), then in genderATlas there is actually no BM.

It is interesting to note how Riegler et al. explain the inability of users to create new atlas maps: "This AtIS feature was implemented in the first version of the ÖROK Atlas, but was eventually abandoned in later versions due to low usage. For participants in the Gender Atlas kick-off workshop, ready-made visualizations were more important than being able to create their own maps" [36; p. 333]. We want to emphasize that providing users with the tools to add their own data and create maps or derived atlases are one of the priority goals of Web 2.0 cartography. At the same time, the hierarchy of knowledge of users is important, which in modern conditions belong to fundamentally different echelons. That is, you do not need to focus on the opinion of end users only who do not have the necessary cartographic knowledge.

The Interactive National Atlas of Spain [37] and the Atlas of Belgium [38] were created using a commercial cartographic Geoclip framework [39]. This framework is limited only by the visualization of statistics, which affects the imperfection of the BM. In our opinion, the framework does not meet the requirements for national atlases, which must comprehensively model the systems of actuality (reflect both socio-economic and physical-geographical phenomena). However, CSP.Tree and CSP.View in the above AtS are observed and can be considered a positive example of the implementation of Web 1.0x1.0 Formation technologies. Consideration of other commercial atlas solutions is left out of this article.

Huber and Schmid in their work on AoS 2 noted [40; p. 1399]: "There is currently no modern software for creating an atlas. So, we had to independently implement the main functionality of the atlas. The lack of the theory of electronic atlas cartography and atlas framework encouraged the developers of the above atlas projects to "start from the beginning" and to form certain requirements for atlases empirically. As a result, several AtS were created, which, with the exception of The Nunaliit Cybercartographic Atlas Framework, accumulated a rather limited amount of knowledge, although sufficient for multiple production of new atlas products and filling their subject area.

In the mid-2000<sup>s</sup>, AA or dynamic atlases seemed to be a reality in 2010. However, the implementations of AoS Online, Atlas of Canada and genderATlas, created by professional cartographers, show a sharp departure from past developments and, despite some advances in technology (i.e., 3D maps in AoS) do not become more dynamic.

Systematization of knowledge and development of new concepts in atlas cartography has not happened in recent years, and theoretical research is mainly limited to the creation and use of atlases, paying much attention to the system "atlas as a product — user as a consumer". Under this approach, the research component of the actuality of the AtS is almost not considered.

CSP is designed to prevent such a trend. CSP.System and the Conceptual Frameworks (CoFr) and Solutions Frameworks (SoFr) of Relational Cartography discussed below can be considered the first steps to the theory of electronic atlas cartography.

## **RESEARCH METHODS**

The research used two methods based on the so-called EA architectural patterns — Relational Cartography frameworks [7] of two types: Conceptual Frameworks (CoFr) and Solutions Frameworks (SoFr). According to [41; p. 247] "A pattern is, in short, both a thing that happens in the world and a rule that tells how to create this thing and when to create it. It is both a process and a thing; both a description of the thing that exists and a description of the process that gives rise to that thing".

If a thing is EA or some of its logical parts, then CoFr and SoFr are at the same time methods — rules and processes of EA or its parts creating. In addition, these same patterns allow us to describe EA: both those that have already been created and those that will be created. Patterns are much more useful when there is an "initial value", which we call a "sample", although the term "example" is also often used. Sometime it can be even "template".

Initially, we used abduction to prove the validity of EA CoFr and SoFr, which was based on almost fifteen years of experience in EA creating. The main result of the abduction was the Conceptual Framework of EA and its sample (initial value) — Electronic version of the National Atlas of Ukraine (EINAU) in the broader sense (EINAUb) [42]. No less important abduction results were Solutions Frameworks, called GeoSolutions Framework (GeoSF) and Atlas Solutions Framework (AtlasSF). GeoSF0 [43] became the sample (initial value) of GeoSF, and EINAU2000 became the first sample of AtlasSF. EINAU2000 was an independent product called Atlas of Ukraine 2000. In fact, EINAU2000 together with the processes of its creation and some other elements became the

first edition of AtlasSF1.0 – AtlasSF1.0(1). Approximately five years later, the EINAU2000 sample was replaced by the 2<sup>nd</sup> version of the AtlasSF sample — firstly RadAtlas2008 (Atlas of radioactive contamination of Ukraine 2008), and then EINAU2007. In fact, RadAtlas2008/EINAU2007 together with the processes of its creation and some other elements became the second edition of AtlasSF1.0 — AtlasSF1.0(2). At the same time, EINAU2000 is also the prototype of EINAU2007.

The monograph [7] provides not only abductive, but also inductive and even deductive inferences about the validity of EA CoFr, GeoSF SoFr and AtlasSF SoFr. In the time that has elapsed since the publication of this monograph, several more results have been obtained that are more strict than by abduction use. To obtain them, facts from Model-Based Engineering (MBE) were used significantly. The results of abductive and more strict inferences are described below.

**Conceptual Framework of EA. Abduction.** EA CoFr is best considered on the sample (example) of EINAUb, the structure scheme of which is shown in Fig. 2. Together with scheme it is the EA Conceptual Framework (CoFr) view with the EINAU2007 initial value. This EA CoFr is valid for all EA in the broadest sense (EAb) from the class to which EINAUb belongs. This is because the epistemological relations of EINAU2007 (EINAUn) CoFr were built from the bottom(EINAUn)-up(EINAUb). In this case, EINAU CoFr is also referred to as EINAUb CoFr. According to the above definition of the pattern [41, p. 247], this framework is ambiguous. It should not be understood as something static and unchanging, so let's highlight the main topics:

- Another name for CoFr — Notional Framework. It explains the general structure of both Spatial Information Systems (SpIS) in the broadest sense (SpISb) in general and EAb in particular. EINAU in the narrow sense (EINAUn) or simply EINAU is a specific type of SpIS, and EINAUb is a specific type of SpISb.

- EINAUn is a conventional system of the class of one-dimensional Electronic atlases (EA). “Conventional” means that everyone is “accustomed” to such systems. Otherwise, under EINAUn or simply EINAU understand the system which is written down on DVD and is called as a product of the end user. This fact is marked with the inscription EINAU in red at the bottom left on the background of the EINAU interface in the rectangle “One-dimensional EA”. To make EINAU two-dimensional, it is necessary to “involve” it in two-dimensionality. Two-dimensionality is achieved at least by supplementing the elements of epistemologically higher stratum into EINAUn. For example, by the elements of the EINAUb Application Stratum (A).

- In addition to the per-stratum two-dimensionality, it is necessary to consider the relations between the levels: D — DataLogics, I — InfoLogics, U — UseLogics. Levels exist for the elements of each stratum.

- The relations and elements of the lower two strata are specified below.

The work considers only three critical systemic properties of SEA. These properties are determined by the relations between certain elements of SEAb and its environment and therefore, according to the definition of the system, are relational. Since we are always dealing with maps, which are the subject component of the system, relational properties can thus be considered systemic.

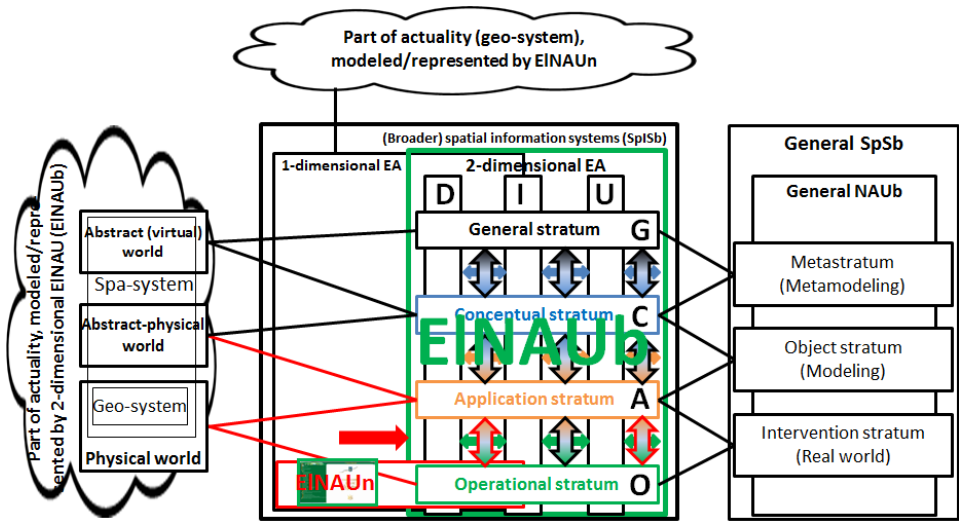


Fig. 2. Structural scheme of EINAUn in the broader sense (EINAUb)

Relations are identified using a modern version of SEAb CoFr (Web 1.0x1.0 Formation), which is structurally similar to EINAUb CoFr (Web 1.0 Formation) between elements of all strata (Fig. 2), but then are used only relations for elements and components from Operational and Application strata. Namely:

1. The relations of SEAb with the actuality shown in red in Fig. 2 left. These relations determine the main critical system property of **CSP.System**: SEAb should be a model of the Spatial System (SpS) of actuality.

2. The relations of the AtlasSF1.0 (AtlasSF1.0+ — the next generation AtlasSF1.0) solutions/contents tree pattern between the elements of the table cells, formed at the intersection of two rows — Operational (O) and Application (A) strata — and the DataLogics (D) column, the first of the levels of DataLogics (D), InfoLogics (I) and UseLogics (U). These relations determine the second critical system property of **CSP.Tree**: The solutions/contents tree should provide sufficient datalogical means for adequate classification of the relevant subject area (SpS of actuality) in its SEAb model. Shown with a red frame around the left vertical double-headed arrow.

3. The relations of the AtlasSF1.0 (AtlasSF1.0+) view pattern between the elements of the table cells formed at the intersection of two rows — Operational (O) and Application (A) strata — and the UseLogics (U) column, the third level of DataLogics (D), InfoLogics (I) and UseLogics (U). These relations define the third critical system property of **CSP.View**: SEAb view means should be sufficient to adequately model the representational needs of users of the Operational and Application echelons of the virtual organization that exists in the world of SEAb use. Shown with a red frame around the right vertical double-headed arrow.

**Atlas Solutions Framework AtlasSF. Abduction.** Formulated above relations 2, 3 are studied using the so-called Atlas Solutions Framework AtlasSF. The first version — AtlasSF1.0 [7] — was used in the creation of EINAUn, as well as other EA and AtIS of classic static type in the first fifteen years of this century (Fig. 3). Most often, this SoFr is perceived through the product part of the framework (Fig. 4), which consists of eight application

patterns (A1-A8) and one architectural pattern (A0), which combines AtlasSF1.0 application patterns in EA or AtIS. AtlasSF1.0 application patterns are usually shown as the following parameterized classes: (A1) User interface, (A2) Solutions/contents tree, (A3) Base map, (A4) Thematic maps (layers), (A5) Cartographic component, (A6) Non-cartographic content, (A7) Local and Content Search, (A8) View (is a logical pattern consisting of views of other application patterns). The above-mentioned "initial values" are used as parameters of these parameterized classes.

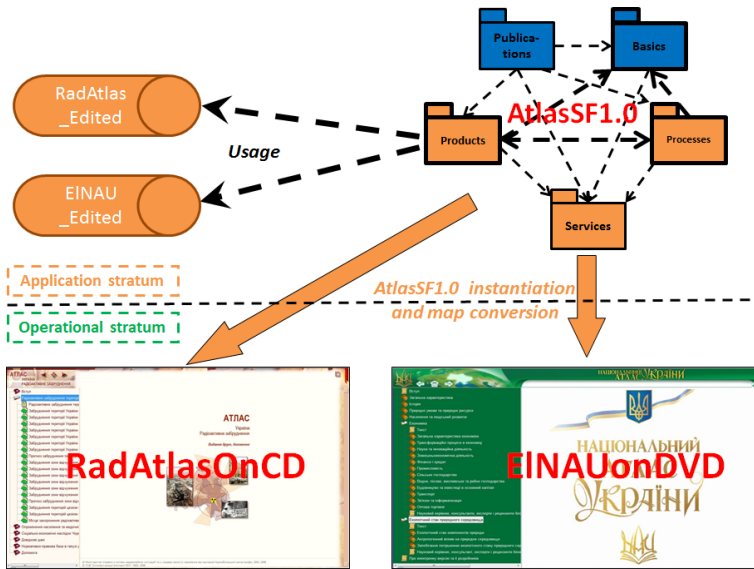


Fig. 3. The principle of AtlasSF1.0 use to create a classic static type AtS

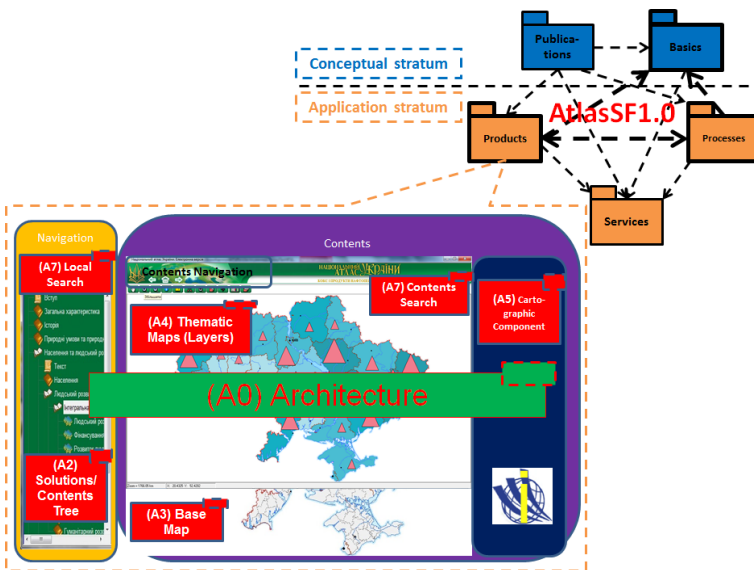


Fig. 4. AtlasSF1.0 Product part on the EINAUn sample

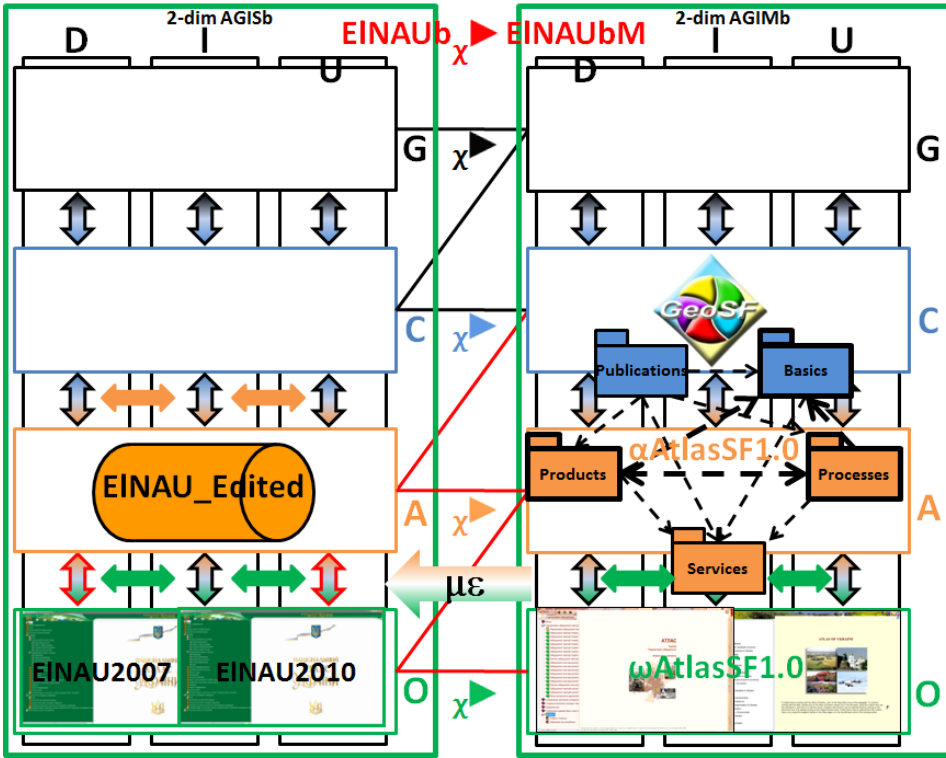


Fig. 5. Refined image of relations 2, 3 for Web 1.0 Formation

Let's specify Fig. 2 by figure Fig. 5 for relations 2 and 3.

Fig. 5 shows:

- EINAU\_Edited — editable variants of EINAU2007/2010.
- EINAU2007, EINAU2010 — two EINAU versions, circulations of which are made from EINAU\_Edited in 2007 and 2010.
- $\omega$ AtlasSF1.0 denotes two atlases: 1) Atlas of Ukraine 2000, 2) RadAtlas2008. The first atlas was used as an operational ( $\omega$ ) sample of EA in the first half of the first decade. The second atlas was used as an operational sample of EA in the second half of the first decade.

- $\alpha$ AtlasSF1.0 denotes the Application ( $\alpha$ ) AtlasSF1.0 SoFr.

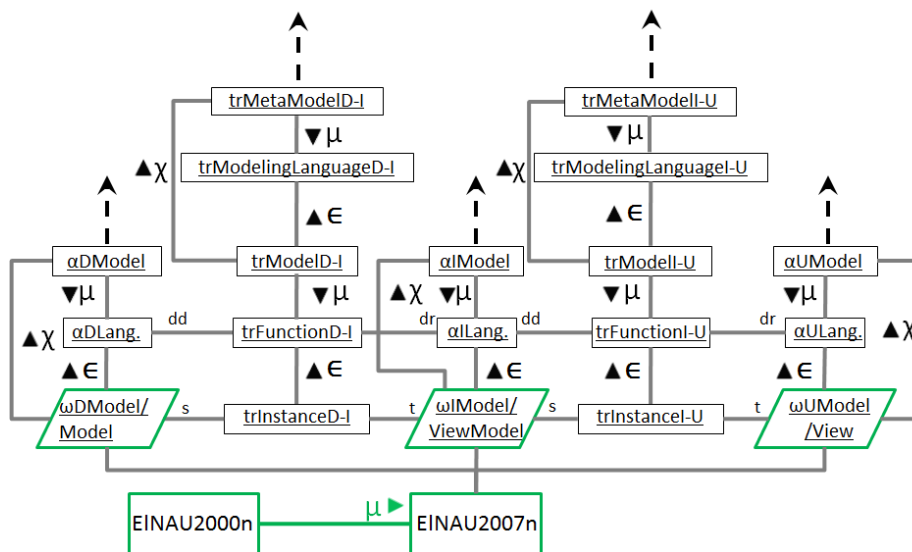
$\chi$  (in green),  $\chi$  (in orange) are the relations of conformity between the elements of the Operational and Application echelons (strata), respectively.  $\chi$  — ConformsTo,  $\mu$  — RepresentationOf,  $\epsilon$  — ElementOf [44].

It should be noted that before the emergence of the atlas problem in 2010, we had no questions about the systemic properties of atlases. In particular, we knew that the resulting atlas must have a solutions/contents tree (A2), as well as a state-of-the-art view of the atlas (A8). In practice, it has been found that a solutions/contents tree is not mandatory for everyone. It also turned out that view is not a problem for everyone. It is believed that the view is enough to replace by the interface (A1) and everything will be OK. However, this is not the case.

At the moment, the first edition of the AtlasSF new generation has been created, which is called AtlasSF1.0+. This edition of AtlasSF1.0+ is used to

create the first AtS of the classic dynamic type. We cannot describe them here, but note that the patterns (A2) Solutions/contents **tree** and (A8) **View** are important and mandatory components of AtlasSF1.0+.

**Model-Based Engineering.** Fig. 6 shows that the EINAUI2007 system is modeled by the EINAUI2000 system and consists of a combination of three Operational models:  $\omega\text{DModel} \cup \omega\text{IModel} \cup \omega\text{UModel}$ . Each of the models corresponds to the components Model, ViewModel and View components of the known pattern MVVM (Model-View-ViewModel — MVVM or MVMV) pattern. The MVVM pattern was chosen as the one that best fits the current view of the AtS of the Operational stratum. It is also logical to use the MVP (Model-View-Presenter) pattern, which is a variation of the well-known MVC pattern [45]. MVC is also a ‘family’ pattern for MVVM. The differences between Controller (C) and ViewModel (VM) become less apparent when using JavaScript on the Operational stratum. The relations shown in Fig. 6 models, presentation software tier patterns and the Operational stratum of AtS CoFr are explained in Fig. 7. In the case of Web 1.0 Formation for AtS, made on optical disks in the architecture of MVC, MVP and MVVM, it is possible to speak about their belonging only to the Operational stratum.

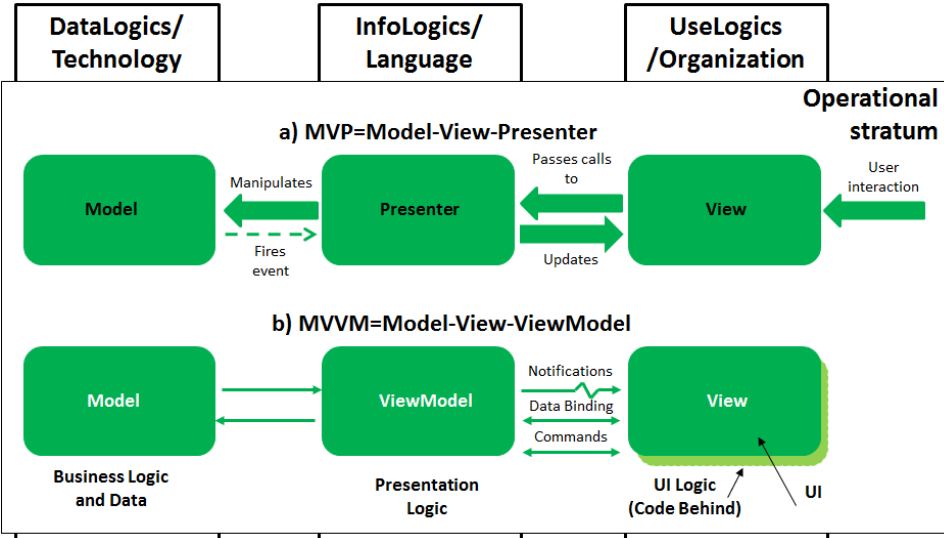


Notation:

- $\omega\text{DModel} \in \text{EINAUI2007}(\text{D}, \text{Y}, \text{Z})$ , where  $\omega$  — Operational stratum, D — DataLogics; the entry  $\text{EINAUI2007}(\text{D}, \text{Y}, \text{Z})$  means the set of all Datalogical EINAUI2007n at arbitrary values of the stratum Y and the formation Z. Note that  $\text{EINAUI2007}(\text{X}, \text{Y}, \text{Z}) = \text{EINAUI2007b}$ , where  $\text{X} = \{\text{levels}\}$ ,  $\text{Y} = \{\text{strata}\}$ ,  $\text{Z} = \{\text{formations}\}$ , b — broader understanding of EINAUI2007, n — narrow understanding; one of the three values of the levels is recorded: D, then I, U. Underline means an instance of the class (object).

- tr — transformation, I — InfoLogics, U — UseLogics,  $\alpha$  — Application stratum.

**Fig. 6.** Part of the deconstructed EINAUI2007



**Fig. 7.** a) MVP [45], b) MVVM [46] patterns of the software presentation tier also as Operational stratum (green color) of AtS CoFr

In Web 1.0+ Formations the situation has changed. AtS are now manufactured and distributed mainly not on optical disks, but on the Internet. In particular, Fig. 6 has a different meaning, because AtS now include not only models of the presentation tier or Operational stratum, but also models of Application or even Conceptual strata. And importantly, these models are implemented in the form of working systems. As an example, we often cite the OpenStreetMap (OSM) geo-information platform (GIP). In the structure of the broader AtS, this platform belongs to the Conceptual stratum and the developers of modern AtS are forced to somehow interact with OSM. The essence of Fig. 7 has also changed. Now it is really a presentation software tier, behind which (above which) there is at least a software business tier and a data tier.

Deconstruction of EINA2007 (Fig. 6) is performed using the so-called "typical pattern of model transformation" [44]. There is also a description of the conformity relation, shown in Fig. 5, Fig. 6. In particular, the model is a conformal (ConformsTo) metamodel. As an example, in Fig. 5 EINA2007 (model) conformal ωAtlasSF1.0 (metamodel). Favre [44] also described the "meta-step" pattern used in obtaining a model from a metamodel.

The article [44] is entitled "Towards a Basic Theory to Model Driven Engineering (MDE)". Despite its small size, it compactly outlines the elements of the theory of MDE. In recent years, this theory has been significantly developed. Now it is better to call it the theory of Model-Based Engineering (MBE) and it includes MDE. We do not have the opportunity to consider this theory in detail, so we will refer only to the monograph [47]. There is the following nesting of model-driven (model-based) phenomena:

$$MDA \subset MDD \subset MDE \subset MBE,$$

where MDA — Model-Driven Architecture, MDD — Model-Driven Development, MDE — Model-Driven Engineering, MBE — Model-Based

Engineering. It is important for us that  $MDA \approx O$ ,  $MDD \approx A$ ,  $MDE \approx C$ ,  $MBE \approx G$ , where  $\approx$  means ‘almost coincide’, O — Operational Stratum, A — Application Stratum, C — Conceptual Stratum, G — General Stratum.

After the publication of the monograph [7], several results were obtained that are important for our research. Their essence is shown in Fig. 8.

Let's explain the notation in the green rectangles "2-dim AGIS" and "2-dim AGIM":

- The values of the notation letters D, I, U and G, C, A, O coincide with those described earlier.
- XYM means XYM(odel) or YYS(ystem), where  $X = D, I, U$ ;  $Y = G, C, A, O$ . For example, DCM stands for Datalogical (D) Conceptual (C) Model (M).
- “2-dim AGIS” and “2-dim AGIM” correspond to the structure of the Conceptual Framework (CoFr) of Relational Cartography [7]. That is, both systems are SpISb, only a special kind. One class of such systems is described in [48].
- There are two values of the model M: in AGIS and in AGIM. There is a  $\chi$  (conformity) relations between AGIS and AGIM and between their strata. In Fig. 8 in the abbreviations of AGIS elements, model M is denoted as S (system).
- Echeloned Atlas Geographic Information System (AGIS) is a generalization of EA, where EA are elements of the lower, Operational, echelon (or, respectively, the Operational stratum).
- Record AGIS  $\chi$  AGIM means that these relations are also valid between the individual echelons. That is, the record AtS  $\chi$  AtlasSF is valid. EA and AtIS can be created using AtlasSF.
- Record AGISn in a red and a green arrow from one-dimensional to two-dimensional IS means the ability to transform the former to the latter.

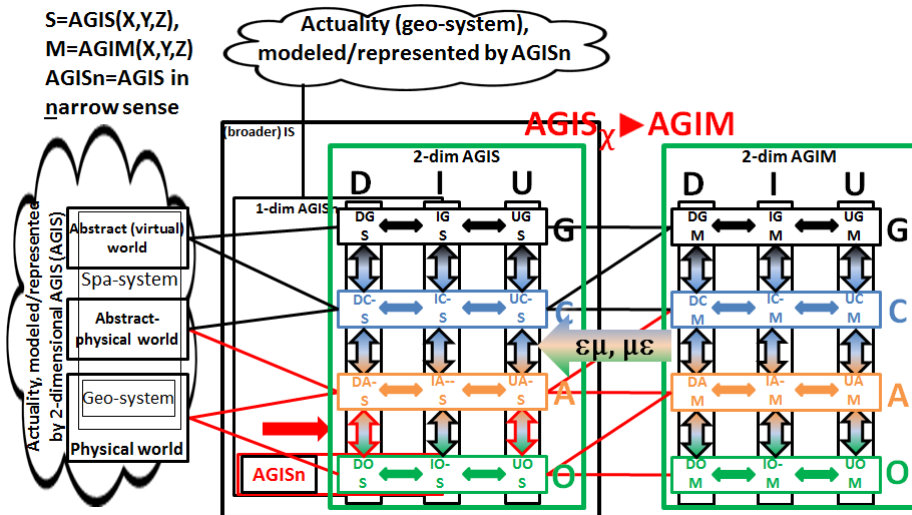


Fig. 8. Conceptual structure of AGIS class systems

Application of Fig. 8 to Fig. 5 allows to formulate tasks 2 and 3 of work. Simply put, they boil down to the following:

Task 2. Research the relations between the components of DOS and DAS of systems  $OS=DOS \cup IOS \cup UOS$  and  $AS=DAS \cup IAS \cup UAS$ .

Task 3. Research the relations between the components of UOS and UAS of systems  $OS=DOS \cup IOS \cup UOS$  and  $AS=DAS \cup IAS \cup UAS$ .

We can not pay much attention to the models shown in the right part of Fig. 5 and Fig. 8. In the description of Fig. 5 there are mentions Solutions Frameworks and samples. Moreover, specific atlases Atlas of Ukraine 2000 and RadAtlas 2008 are called samples. These are kinds of models that were used to create other EA. In a sense, patterns are the best models that developers need to find to be successful. Due to the presence of models that are "higher" organized than the systems created with their help, we can talk about a constructive (normative) and at the same time systemic approach to the development. That is, first there must be a model and only then a system can be created. The declarative approach to the development of systems such as EA and AtIS significantly loses to the constructive approach.

The 2010 atlas problem arose because the models of the previous period stopped working, and new time-appropriate models have not yet been created. This is what happened in the project of developing the Atlas of emergency situations in 2010-2015. Then we tried unsuccessfully to apply the current edition of AtlasSF1.0(2), so we had to urgently develop and release a new edition of AtlasSF1.0(3) without changing the generation. Only in 2018 we developed the first edition of AtlasSF1.0+ and switched to atlases of the classic dynamic type.

## CONCLUSIONS

The capabilities of modern atlas information technologies are much richer than those that existed before the Web 2.0 epoch. However, the theoretical foundations of these technologies have not acquired evolution necessary for practice. This situation has given rise to several theoretical and practical problems. In the article, they are formulated as problems of a new generation of electronic atlases, which are called systemic.

To solve the problems of modern EA of the new generation, it is proposed to use the methods of Conceptual Frameworks (CoFr) and Solutions Frameworks (SoFr) of Relational Cartography. The CoFr method is used to obtain the currently relevant three-stratum structure of systemic EA. This will allow us to investigate the first critical system property of systemic EA – CSP.System – about the necessity of certain relations between the systemic EA and the corresponding spatial system of actuality.

The SoFr method is used to study the relations between the components of two adjacent strata of modern systemic EA, called CSP.Tree and CSP.View. The article shows the analogies of CoFr and SoFr with the constructions of Model-Based Engineering.

## REFERENCES

1. Hurni Lorenz. Atlas Information Systems, pp. 85-92. In Shekhar Shashi, Xiong Hui, Zhou Xun, Eds. *Encyclopedia Of GIS*.- Springer, 2017, 2nd Ed. 2507 (2550) p.
2. Large Encyclopedic Dictionary. Ch. editor Prokhorov A.M. *Soviet Encyclopedia*, 1993. 1628 p. (in Russian)
3. Salichtchev K.A. *Cartography. Textbook*.- M.: MSU Publishing, 3rd Ed. 1990. 400 p. (in Russian)
4. Vozenilek Vit. Aspects of the Thematic Atlas Compilation, pp. 3–12. In: Brus Jan, Vondrakova Alena, Vozenilek Vit, Eds. *Modern Trends in Cartography: Selected Papers of CARTOCON 2014*. Springer, 2015. 534 p.
5. <https://icaci.org>, accessed 2021-may-05.
6. Etymological dictionary of the modern Russian language. Compiled by A.K. Shaposhnikov: in 2 volumes - M.: Flinta, 2016, 2nd ed. stereotyped. V. 1. 584 p. V. 2. 576 p. (in Russian)
7. Chabaniuk Viktor. *Relational cartography: Theory and practice*. Kyiv: Institute of Geography of the NAS of Ukraine, 2018. 525 p. (in Ukrainian)
8. Kraak Menno-Jan, Ormeling Ferjan. *Cartography: Visualization of Geospatial Data*.- Prentice Hall, 2010, 3rd Ed. 198 (249) p.
9. Cauvin Colette, Escobar Francisco, Serradj Aziz. *Thematic Cartography. Volume 3: New Approaches in Thematic Cartography*. ISTE-Wiley, 2010 (Adapted and updated from two volumes *Cartographie Thématique 3 et 4*. L'AVOISIER, 2008). 291 (320) p.
10. Chabaniuk V., Dyshlyk O. Atlas Basemaps in Web 2.0 Epoch. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B4, 2016 XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic, pp. 611-618.
11. Sui Daniel Z., Holt James B. Visualizing and Analysing Public-Health Data Using Value-by-Area Cartograms: Toward a New Synthetic Framework.- *Cartographica*, Vol. 43, Iss. 1, 2008, pp. 3–20.
12. Berlyant, A.M. *Geoiconics*. M.: Astrea, 1996. 208 p. (in Russian)
13. Roth Robert E. *Interacting with Maps: The science and practice of cartographic interaction*. The Pennsylvania State University, Doctor of Philosophy (Geography) Dissertation. 2011. 215 (225) p. DOI: 10.1179/1743277412Y.0000000019.
14. Sieber, R. and Losang, E.: Current Challenges in Atlas Cartography, *Abstr. Int. Cartogr. Assoc.*, 2, 32, <https://doi.org/10.5194/ica-abs-2-32-2020>, 2020.
15. Vozenilek, Vit. Atlases and Systems Theory within Systematic Cartography, *Abstr. Int. Cartogr. Assoc.*, 1, 386, 2019.
16. Azócar Fernandez Pablo Iván, Buchroithner Manfred Ferdinand. *Paradigms in Cartography: An Epistemological Review of the 20<sup>th</sup> and 21<sup>st</sup> Centuries*. Springer, 2014. 150 p.
17. Andreessen Marc. 2007. Analyzing the Facebook Platform, three weeks in [Blog post]. [https://web.archive.org/web/20071002070223/http://blog.pmarca.com/2007/06/analyzing\\_the\\_f.html](https://web.archive.org/web/20071002070223/http://blog.pmarca.com/2007/06/analyzing_the_f.html). Accessed 2021-may-03.
18. Pulsifer Peter L., Taylor D.R. Fraser. The cartographer as mediator: Cartographic representation from shared geographic information, pp. 149-180. In Taylor D.R. Fraser (Ed.). *Cybercartography: Theory and Practice (Modern Cartography Series 4)*. Elsevier, 2005. 574 p.
19. Parush A., Pulsifer P.L., Philips K., Dunn G. Understanding Through Structure: The Challenges of Informational and Navigation Architecture in Taylor D.R.F. and Caquard S. (eds.) *Cybercartography. Special Issue of Cartographica on Cybercartography*, 2006, 41 (1), 21–34.
20. Nunaliit, <http://nunaliit.org>, accessed 2021-may-05.
21. Hayes Amos, Pulsifer Peter L., Fiset J.P. The Nunaliit Cybercartographic Atlas Framework, pp. 129–140. In Taylor D.R. Fraser, Editor. *Developments in the Theory and Practice of Cybercartography: Applications and Indigenous Mapping (Modern Cartography Series 5)*. Elsevier, 2014. 364 p.
22. Reyes Maria del Carmen. *Cybercartography from a Modelling Perspective*, pp. 63–99. In: Taylor D.R. Fraser (Ed.). *Cybercartography: Theory and Practice (Modern Cartography Series 4)*. Elsevier, 2005. 574 p.

23. Reyes Carmen, Taylor D.R. Fraser, Martinez Elvia, Lopez Fernando. Geocybernetics: A new Avenue of Research in Geomatics?- *Cartographica: The International Journal of Geographic Information and Geovisualization*, 41(1), 2006, pp. 7–20.
24. Reyes C., Parás M. Geocybernetics: A pathway from empiricism to cognitive frameworks. En "GEOcibernética: Innovating in Geomatics for Society". 2012. [http://www.geocibernetica.org/jou.l.f.lal/index.php/diciem\\_bre2012/resumen-2012-02](http://www.geocibernetica.org/jou.l.f.lal/index.php/diciem_bre2012/resumen-2012-02).
25. Taylor D.R. Fraser. Some recent developments in the theory and practice of Cybercartography, pp. 55–68. In: Taylor D.R. Fraser, Anonby Erik, Murasugi Kumiko (Eds.). *Further Developments in the Theory and Practice of Cybercartography* (Modern Cartography Series 9). Elsevier, 2019. 525 p.
26. Lopez-Caloca F., Sanchez-Sandoval R., Reyes M., Lopez-Caloca A., 2014. From cybercartography to the paradigm of geocybernetics, pp. 17–32. In: Taylor D.R.F. (Ed.), *Developments in the Theory and Practice of Cybercartography: Applications and Indigenous Mapping* (Modern Cartography Series 5). Elsevier, 2014. 364 p.
27. Köbben Barend. Towards a National Atlas of the Netherlands as Part of the National Spatial Data Infrastructure. *The Cartographic Journal*, Vol. 50, No. 3, 2013, pp. 225–231.
28. Bär H.R., Sieber R. Towards high standard interactive atlases. In: *Proceedings of the International Cartographic Conference*, Beijing, China, 2001, 7 p.
29. Sieber Rene, Serebryakova Marianna, Schnurer Raimund, Hurni Lorenz. *Atlas of Switzerland Goes Online and 3D - Concept, Architecture and Visualization Methods*, pp. 171–184 // Gartner Georg, Jobst Markus, Huang Haosheng, Editors. *Progress in Cartography. EuroCarto 2015* (Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Subseries: Publications of the International Cartographic Association (ICA)). Springer, 2016. 480 p.
30. Sieber Rene, Hollenstein Livia, Odden Benedicte, Hurni Lorenz. From Classic Atlas Design to Collaborative Platforms – The SwissAtlasPlatform Project. 25<sup>th</sup> International Cartographic Conference, Paris, 2011, 10 p.
31. <https://www.atlasderschweiz.ch/>. The version as of 06.02.2021 is considered.
32. Sieber René, Schmid Christoph, Wiesmann Samuel. Smart legend – smart atlas! XXII International Cartographic Conference (ICC2005), 2005, 9 p.
33. Lechthaler Mirjanka. Interactive and Multimedia Atlas Information Systems as a Cartographic Geo-Communication Platform, pp. 382–402 / LNG&C2010, *Cartography in Central and Eastern Europe. Selected Papers of the 1st ICA Symposium on Cartography for Central and Eastern Europe*. Gartner Georg, Ortag Felix (Eds.). Springer, 2010. 570 p.
34. genderATlas (accessed 2021-may-05, <http://genderatlas.at/#projektinfo>).
35. genderATlas für die Schule (accessed 2021-may-05, <http://genderatlas.at/schule/>).
36. Riegler M., Wenk M.L., Aufhauser E., Ledermann F., Schmidt M., Gartner G.- genderATlas Österreich – Entwicklung eines zielgruppenorientierten Online-Tools. 2015.
37. Interactive National Atlas of Spain (<https://interactivo-atlasnacional.ign.es>, accessed 2021-may-05).
38. Interactive Atlas of Belgium (<https://www.atlas-belgique.be>, accessed 2021-may-05).
39. Geoclip framework (<https://www.geoclip.fr>, accessed 2021-may-05)
40. Huber S., Schmid C. 2<sup>nd</sup> atlas of Switzerland: interactive concepts, functionality and techniques.- In: *Proceedings of the 21<sup>st</sup> International Cartographic Conference*, Durban, ICA, 2003, pp. 1398–1405.
41. Alexander Christopher. *The Timeless Way Of Building*. Oxford University Press, 1979. 552 p.
42. Chabaniuk V.S., Dyshlyk O.P. Conceptual Framework of the Electronic version of the National Atlas of Ukraine.- *Ukrainian Geographical Journal*, 2014, № 2, p. 58-68. (in Ukrainian)
43. Chabaniuk Viktor, Dyshlyk Oleksandr. GeoSolutions Framework Reinvented: Method, pp. 115–138 // in *Analysis, Modeling and Control. Vol. 3, Collection of Scientific Papers of the Department of Applied Nonlinear Analysis*. Edited by prof. Makarenko A.S.- Institute for Applied System Analysis at the Igor Sikorsky Kyiv Politechnic Institute, Kyiv, 2018. 250 p.
44. Favre Jean-Marie. Towards a Basic Theory to Model Model Driven Engineering. *Proc. of the 3<sup>rd</sup> UML Workshop in Software Model Engineering (WiSME'2004)*, 2004, 8 p.

45. Bhatt Niraj. MVC vs. MVP vs. MVVM.- July 18, 2009. (accessed 2021-may-05, <http://nirajrules.wordpress.com/2009/07/18/mvc-vs-mvp-vs-mvvm/>).
46. Implementing the MVVM Pattern Using the Prism Library 5.0 for WPF, 2014-may-05.- [https://docs.microsoft.com/en-us/previous-versions/msp-n-p/gg405484\(v=pandp.40\)](https://docs.microsoft.com/en-us/previous-versions/msp-n-p/gg405484(v=pandp.40)), accessed 2021-may-03.
47. Brambilla Marco, Cabot Jordi, Wimmer Manuel. Model-driven Software Engineering in Practice (Synthesis Lectures on Software Engineering).- Morgan & Claypool Publishers, 2<sup>nd</sup> Ed., 2017. 209 p.
48. Cultural heritage in the Atlas geoinformation system of sustainable development of Ukraine: L.G. Rudenko, K.A. Polyvach, V.S. Chabaniuk, et al. / Editor L.G. Rudenko. Kyiv: Institute of Geography of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2018. 172 p. (in Ukrainian)

Received 22.03.2021

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Hurni Lorenz. Atlas Information Systems, pp. 85–92. In Shekhar Shashi, Xiong Hui, Zhou Xun, Eds. Encyclopedia Of GIS. Springer, 2017, 2nd Ed. 2507 (2550) p.
2. Большой Энциклопедический Словарь. Гл. редактор Прохоров А.М. Советская Энциклопедия, 1993. 1628 с.
3. Салищев К.А. Картоведение. Учебник. М.: Изд-во МГУ, 3-е изд. 1990. 400 с.
4. Vozenilek Vit, Brus Jan, Vondrakova Alena. Aspects of the Thematic Atlas Compilation, pp. 3-12. In Modern Trends in Cartography: Selected Papers of CARTO-CON 2014. Springer, 2015. 534 p.
5. URL: <https://icaci.org> (Дата звернення: 05.05.2021).
6. Этимологический словарь современного русского языка. Сост. А.К. Шапошников: в 2 т. М.: Флинта, 2016, 2-е изд. стереотип. Т. 1. 584 с. Т. 2. 576 с.
7. Чабанюк В. С. Реляційна картографія: Теорія та практика. Київ: Інститут географії НАН України, 2018. 525 с.
8. Kraak Menno-Jan, Ormeling Ferjan. Cartography: Visualization of Geospatial Data.- Prentice Hall, 2010, 3rd Ed. 198 (249) p.
9. Cauvin Colette, Escobar Francisco, Serradj Aziz. Thematic Cartography. Volume 3: New Approaches in Thematic Cartography. ISTE-Wiley, 2010 (Adapted and updated from two volumes Cartographie Thématique 3 et 4. LAVOISIER, 2008). 291 (320) p.
10. Chabaniuk V., Dyshlyk O. Atlas Basemaps in Web 2.0 Epoch. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLI-B4, 2016 XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic, pp. 611–618.
11. Sui Daniel Z., Holt James B. Visualizing and Analysing Public-Health Data Using Value-by-Area Cartograms: Toward a New Synthetic Framework. *Cartographica*. Vol. 43. Iss. 1. 2008. pp. 3–20.
12. Берлянт, А.М. Геоиконика. М.: Астрей, 1996. 208 с.
13. Roth Robert E. Interacting with Maps: The science and practice of cartographic interaction. The Pennsylvania State University, Doctor of Philosophy (Geography) Dissertation. 2011. 215 (225) p. DOI: 10.1179/1743277412Y.0000000019.
14. Sieber, R. and Losang, E.: Current Challenges in Atlas Cartography, Abstr. Int. Cartogr. Assoc. 2, 32. <https://doi.org/10.5194/ica-abs-2-32-2020>, 2020.
15. Vozenilek Vit. Atlases and Systems Theory within Systematic Cartography, Abstr. Int. Cartogr. Assoc., 1, 386, 2019.
16. Azócar Fernandez Pablo Iván, Buchroithner Manfred Ferdinand. Paradigms in Cartography: An Epistemological Review of the 20<sup>th</sup> and 21<sup>st</sup> Centuries. Springer, 2014. 150 p.
17. Andreessen Marc. 2007. Analyzing the Facebook Platform, three weeks in. URL: [https://web.archive.org/web/20071002070223/http://blog.pmarca.com/2007/06/analyzing\\_the\\_f.html](https://web.archive.org/web/20071002070223/http://blog.pmarca.com/2007/06/analyzing_the_f.html). (Дата звернення: 03.05.2021).
18. Pulsifer Peter L., Taylor D.R. Fraser. The cartographer as mediator: Cartographic representation from shared geographic information, pp. 149–180. *Cybercartography: Theory and Practice (Modern Cartography Series 4)*. Elsevier, 2005. 574 p.

19. Parush A., Pulsifer P.L., Philips K., Dunn G. Understanding Through Structure: The Challenges of Informational and Navigation Architecture in Taylor D.R.F. and Caquard S. (eds.) *Cybercartography. Special Issue of Cartographica on Cybercartography*. 2006. 41 (1). P. 21–34.
20. Nunaliit. URL: <http://nunaliit.org>. (Дата звернення: 05.05.2021).
21. Hayes Amos, Pulsifer Peter L., Fiset J.P. The Nunaliit Cybercartographic Atlas Framework, pp. 129–140. *Developments in the Theory and Practice of Cybercartography: Applications and Indigenous Mapping (Modern Cartography Series 5)*. Elsevier, 2014. 364 p.
22. Reyes Maria del Carmen, Fraser D.R. Cybercartography from a Modelling Perspective, pp. 63–99. *Cybercartography: Theory and Practice (Modern Cartography Series 4)*. Elsevier, 2005. 574 p.
23. Reyes Carmen, Taylor D.R. Fraser, Martinez Elvia, Lopez Fernando. Geocybernetics: A new Avenue of Research in Geomatics? *Cartographica: The International Journal of Geographic Information and Geovisualization*. 41(1). 2006. pp. 7–20.
24. Reyes C., Parás M. Geocybernetics: A pathway from empiricism to cognitive frameworks. En "GEOcibernética: Innovating in Geomatics for Society". 2012. [http://www.geocibernetica.org/jou.l.f.lal/index.php/diciem\\_bre2012/resumen-2012-02](http://www.geocibernetica.org/jou.l.f.lal/index.php/diciem_bre2012/resumen-2012-02).
25. Taylor D.R. Fraser, Anonby Erik, Murasugi Kumiko. Some recent developments in the theory and practice of Cybercartography, pp. 55–68. *Further Developments in the Theory and Practice of Cybercartography (Modern Cartography Series 9)*. Elsevier, 2019. 525 p.
26. Lopez-Caloca F., Sanchez-Sandoval R., Reyes M., Lopez-Caloca A., 2014. From cybercartography to the paradigm of geocybernetics, pp. 17–32. *Developments in the Theory and Practice of Cybercartography: Applications and Indigenous Mapping (Modern Cartography Series 5)*. Elsevier, 2014. 364 p.
27. Köbben Barend. Towards a National Atlas of the Netherlands as Part of the National Spatial Data Infrastructure. *The Cartographic Journal*. Vol. 50. No. 3. 2013. P. 225–231.
28. Bär H.R., Sieber R. Towards high standard interactive atlases. *Proceedings of the International Cartographic Conference*, Beijing, China. 2001. 7 p.
29. Sieber Rene, Serebryakova Marianna, Schnurer Raimund, Hurni Lorenz. Atlas of Switzerland Goes Online and 3D - Concept, Architecture and Visualization Methods, pp. 171–184. *Progress in Cartography. EuroCarto 2015 (Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Subseries: Publications of the International Cartographic Association (ICA))*. Springer, 2016. 480 p.
30. Sieber Rene, Hollenstein Livia, Odden Benedicte, Hurni Lorenz. From Classic Atlas Design to Collaborative Platforms – The SwissAtlasPlatform Project. *25<sup>th</sup> International Cartographic Conference*. Paris. 2011. 10 p.
31. URL: <https://www.atlasderschweiz.ch/>. (Дата звернення: 06.02.2021).
32. Sieber René, Schmid Christoph, Wiesmann Samuel. Smart legend – smart atlas! *XXII International Cartographic Conference (ICC2005)*. 2005. 9 p.
33. Lechthaler Mirjanka. Interactive and Multimedia Atlas Information Systems as a Cartographic Geo-Communication Platform, pp. 382–402. *LNG&C2010, Cartography in Central and Eastern Europe. Selected Papers of the 1st ICA Symposium on Cartography for Central and Eastern Europe*. Springer, 2010. 570 (591) p.
34. genderATlas. URL: <http://genderatlas.at/#projektinfo> (Дата звернення: 05.05.2021).
35. genderATlas für die Schule. URL: <http://genderatlas.at/schule/> (Дата звернення: 05.05.2021).
36. Riegler M., Wenk M.L., Aufhauser E., Ledermann F., Schmidt M., Gartner G.- genderATlas Österreich Entwicklung eines zielgruppenorientierten Online-Tools. 2015.
37. Інтерактивний Національний Атлас Іспанії. URL: <https://interactivo-atlasnacional.ign.es> (Дата звернення: 05.05.2021).
38. Інтерактивний Атлас Бельгії. URL: <https://www.atlas-belgique.be> (Дата звернення: 05.05.2021).
39. Geoclip URL: <https://www.geoclip.fr> (Дата звернення: 05.05.2021).

40. Huber S., Schmid C. 2<sup>nd</sup> atlas of Switzerland: interactive concepts, functionality and techniques. *Proceedings of the 21<sup>st</sup> International Cartographic Conference*, Durban, ICA. 2003. P. 1398–1405.
41. Alexander Christopher. *The Timeless Way Of Building*. Oxford University Press, 1979. 552 p.
42. Чабанюк В.С., Дишлик О.П. Концептуальний Каркас Електронної версії Національного атласу України. *Український географічний журнал*. 2014. № 2. с. 58–68.
43. Chabaniuk Viktor, Dyshlyk Oleksandr. GeoSolutions Framework Reinvented: Method, pp. 115-138. *Analysis, Modeling and Control*. Vol. 3, Collection of Scientific Papers of the Department of Applied Nonlinear Analysis. Edited by prof. Makarenko A.S. Institute for Applied System Analysis at the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, 2018. 250 p.
44. Favre Jean-Marie. Towards a Basic Theory to Model Model Driven Engineering. *Proc. of the 3<sup>rd</sup> UML Workshop in Software Model Engineering (WiSME'2004)*. 2004. 8 p.
45. Bhatt Niraj. MVC vs. MVP vs. MVVM. July 18, 2009. URL: <http://nirajrules.wordpress.com/2009/07/18/mvc-vs-mvp-vs-mvvm/> (Дата звернення: 05.05.2021).
46. Implementing the MVVM Pattern Using the Prism Library 5.0 for WPF, 2014-may-05.- URL: [https://docs.microsoft.com/en-us/previous-versions/msp-n-p/gg405484\(v=pandp.40\)](https://docs.microsoft.com/en-us/previous-versions/msp-n-p/gg405484(v=pandp.40)) (Дата звернення: 03.05.2021.)
47. Brambilla Marco, Cabot Jordi, Wimmer Manuel. *Model-driven Software Engineering in Practice (Synthesis Lectures on Software Engineering)*. Morgan & Claypool Publishers, 2<sup>nd</sup> Ed. 2017. 209 p.
48. Руденко Л.Г., Поливач К.А., Чабанюк В.С., та ін. Культурна спадщина в Атласній геоінформаційній системі сталого розвитку України. / Редактор Л.Г. Руденко. Київ: Інститут географії НАН України, 2018. 172 с.

Отримано 22.03.2021

Чабанюк В.С.<sup>1,2</sup>, канд. фіз.-мат. наук,  
старш. наук. співроб. відд. картографії Інституту географії НАН України,  
директор ТОВ «Інтелектуальні системи-ГЕО»,  
ORCID: 0000-0002-4731-7895  
e-mail: chab3@i.ua, chab@isgeo.kiev.ua

Колімасов І.М.<sup>2</sup>,  
начальник виробництва ТОВ "Інтелектуальні системи-ГЕО",  
ORCID: 0000-0002-4927-4200  
e-mail: kolimasov@ukr.net, van@isgeo.kiev.ua

Краковський С.П.<sup>1</sup>,  
молодш. наук. співроб. відд. картографії Інституту географії НАН України,  
ORCID: 0000-0001-5164-6272  
email: krakovsp@gmail.com

<sup>1</sup> Інститут географії НАН України,  
вул. Володимирська, 44, м. Київ, 01030, Україна

<sup>2</sup> ТОВ «Інтелектуальні системи-ГЕО»,  
вул. Микільсько-Слобідська, 6/44, м. Київ, 02002, Україна

## КРИТИЧНІ СИСТЕМНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОННИХ АТЛАСІВ НОВОГО ПОКОЛІННЯ. ЧАСТИНА 1: ПРОБЛЕМА І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

**Вступ.** Революційні зміни інформаційних технологій останніх двох десятиліть надають змогу конструювати електронні атласи (ЕА), можливості яких принципово багатіші за можливості «класичних» ЕА. Це досягається завдяки використанню системних властивостей ЕА нового покоління, які тому називаються системними. Системні ЕА залишаються найпростішими і найефективнішими просторовими інформаційними моделями територіальних систем, що уможливило їхнє застосування для розв'язання багатьох практичних завдань.

**Метою** статті є обґрунтування потреби у системних ЕА і визначення методів дослідження їхніх системних властивостей. Ці методи буде використано для пошуку і опису критичних системних властивостей, без яких ЕА не можуть бути системними. Методи ґрунтуються на реляційній картографії та базованій на моделях інженерії.

**Результати.** Розглянуто еволюцію «класичних» ЕА: від паперових атласів та їхніх образів до аналітичних атласів. Показано, що на уявній межі класичних і некласичних ЕА вже знаходяться ЕА нового покоління – системні ЕА. Як теорія, так і практика таких системних ЕА мають ще багато невирішених проблем. Частина з них описано у статті. Автори вважають, що багато проблем можливо вирішити, якщо реалізовувати критичні системні властивості ЕА. Для дослідження проблем і для доказу результатів використовуються два методи: Концептуальних каркасів і Каркасів рішень. Описано як самі методи, так і можливість їхнього застосування для знаходження критичних системних властивостей ЕА нового покоління.

**Висновки.** Описано головні проблеми електронних атласів нового покоління і запропоновано їх вирішення за допомогою методу Концептуальних каркасів і методу Каркасів рішень.

**Ключові слова:** системний електронний атлас, Концептуальний каркас, Каркас рішень, критична системна властивість.

DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt204.02.049>

УДК 519.688

**ШЕПЕТУХА Ю.М.**, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.,  
провідн. наук. співроб. відд. інтелектуального управління,  
ORCID: 0000-0002-6256-5248

e-mail: [yshep@meta.ua](mailto:yshep@meta.ua)

**ВОЛКОВ О.Є.**, канд. техн. наук,  
зав. відд. інтелектуального управління  
ORCID: 0000-0002-5418-6723

e-mail: [alexvolk@ukr.net](mailto:alexvolk@ukr.net)

**КОМАР М.М.**, канд. техн. наук,  
старш. наук. співроб. відд. інтелектуального управління  
ORCID: 0000-0002-0119-0964

e-mail: [nickkomar08@gmail.com](mailto:nickkomar08@gmail.com)

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

## ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В АВТОНОМНИХ СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ

---

**Вступ.** У сучасному світі науково-технічний рівень держави значною мірою визначається поточним станом та темпами розвитку інформаційних технологій. Водночас магістральним шляхом вдосконалення інформаційних технологій є їх інтелектуалізація. За рахунок інтелектуалізації стала можливою побудова перспективних систем з принципово новими функційними можливостями, зокрема, високошвидкісних комп'ютерних комплексів, здатних до автономних дій у складному та динамічному середовищі. Важливу роль у роботі автономних комплексів відіграють системи керування складними об'єктами та процесами. У зв'язку з цим дослідження теоретичних та прикладних питань побудови таких систем є актуальною науково-технічною проблемою.

**Мета статті** — проаналізувати поточний стан та перспективи розвитку нового напрямку у сфері інтелектуалізації інформаційних технологій — побудови систем автономного керування складними об'єктами та процесами у динамічному середовищі; сформулювати обґрунтований підхід до підвищення рівня інтелектуалізації процесів прийняття рішень у таких системах.

**Методи.** Створення автономних систем керування та підвищення рівня інтелектуалізації процесів прийняття рішень у таких системах базується на використанні таких концептуальних, теоретичних та методологічних інструментів: теорія інтелектуалізації інформаційних технологій, інтелектуального керування, теоретичні засади побудови

систем штучного інтелекту, методи прийняття рішень, методологія образного мислення, методи моделювання образного сприйняття зовнішнього середовища.

**Результати.** Розглянуто підхід до взаємоузгодженого використання методів штучного інтелекту, прийняття рішень та інтелектуального керування для створення автономних засобів керування складними об'єктами та процесами. Обґрунтовано доцільність побудови систем, профільованих для роботи у визначених предметних областях. Визначено специфічні особливості та складники механізмів прийняття рішень у системах інтелектуального керування. Підкреслено необхідність створення інтелектуального середовища та важливу роль сенсорних мереж у розв'язанні цього завдання. Запропоновано методологію побудови інформаційних образів, які відображають найважливіші компоненти поточної ситуації. Розглянуто приклади застосування сформованих образів для здійснення як динамічного, так і еволюційного перепланування.

**Висновки.** Доцільним шляхом побудови інтелектуалізованих систем керування є такий, що передбачає взаємоузгоджене застосування різних типів моделей. Образне подання істотних взаємозв'язків поточної ситуації є ефективним засобом інтелектуалізації на різних етапах процесу прийняття рішень — генерування альтернатив, розуміння невідповідності між різними джерелами даних, здійснення процедури вибору, оцінювання результатів. Застосування елементів штучного інтелекту в автономних системах є особливо обґрунтованим у випадках дефіциту часу та наявності великої кількості альтернативних варіантів дій.

**Ключові слова:** інтелектуалізація інформаційних технологій, інтелектуальне керування, прийняття рішень, автономність, штучний інтелект, образ, невизначеність, адаптація.

## ВСТУП

У сучасному світі науково-технічний рівень держави значною мірою визначається поточним станом та темпами розвитку інформаційних технологій. Водночас магістральним шляхом вдосконалення інформаційних технологій є їх інтелектуалізація. За рахунок інтелектуалізації стала можливою побудова перспективних систем з принципово новими функційними можливостями, зокрема, високошвидкісних комп'ютерних комплексів, здатних до автономних дій у складному та змінному середовищі. Важливу роль у роботі автономних комплексів відіграють системи керування динамічними об'єктами та процесами. Властивість автономності є ключовою для багатьох систем керування — вона дає можливість замкнути контур зворотного зв'язку між спостереженням, осмисленням поточної ситуації, плануванням та виконанням необхідних дій [1]. Відзначають велику кількість різноманітних проблем, що виникають у спробах створення автономних систем керування та суттєво обмежують можливості для їхнього ефективного функціонування [2, 3]. Тому дослідження теоретичних та прикладних питань побудови таких систем є актуальною науково-технічною проблемою.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Концепція інтелектуалізації привертає все більшу увагу дослідників як у розгляді теоретичних проблем керування цілеспрямованою поведінкою, так і у вирішенні практичних питань побудови систем керування складними динамічними об'єктами та процесами для забезпечення необхідних показників якості, швидкодії та стійкості. Аналіз літературних джерел дає змогу відзначити сталу тенденцію до застосування у процесі керування все більшої кількості інтелектуальних функцій, безпосередньо або опосередковано пов'язаних з прийняттям рішень — таких як розпізнавання образів,

аналіз поточної ситуації, планування та корегування потрібних дій. Так, у роботі [4] інтелектуальне керування взагалі визначається як процес автономного прийняття рішень у структурованому або неструктурованому середовищі, який ґрунтується на спільному використанні таких наукових напрямів: комп'ютерні науки, штучний інтелект, дослідження операцій, теорія автоматичного керування. Для автономних систем, що, як правило, повинні виконувати свої функції без безпосереднього втручання людини, методи та засоби штучного інтелекту мають особливо великі перспективи успішного застосування. Слід зазначити, що термін «штучний інтелект» звичайно використовується у тих випадках, коли за допомогою апаратно-програмних засобів імітують певні інтелектуальні дії людини. Так, за Оксфордським словником, системи штучного інтелекту визначаються як «комп'ютерні системи, що мають здатність виконувати завдання, які звичайно потребують використання інтелекту людини — такі як візуальне сприйняття інформації, розпізнавання усної мови, прийняття рішень та переклад» [5]. Також відзначається, що штучний інтелект — це здатність комп'ютеризованих технічних засобів відтворювати ті або інші аспекти розумної поведінки людини [6]. На думку авторів, ключовими елементами штучного інтелекту є процеси міркування, планування та навчання, тобто саме ті процеси, що є головними складниками у прийнятті рішень. Наразі невирішеними є багато питань стосовно концептуальних аспектів взаємозв'язку методів прийняття рішень та методів штучного інтелекту [7]. У цьому контексті необхідно також враховувати, що до певного часу практично не перетиналися між собою наукові напрями, пов'язані з розробленням методів штучного інтелекту та побудовою систем керування складними динамічними об'єктами та процесами. У межах кожного з цих напрямів створювався свій науковий інструментарій, пристосований до аналізу та розв'язання специфічних завдань своєї предметної галузі. Але останнім часом помітною стала тенденція до посилення взаємного зв'язку, суттєвого зближення та навіть об'єднання вказаних напрямів досліджень. Одним з витоків такої тенденції є підвищення інтересу до теоретичних і практичних питань створення автономних систем інтелектуального керування, зокрема, засобів автономного керування динамічними об'єктами та процесами.

**Мета** статті — проаналізувати поточний стан та перспективи розвитку нового напрямку у сфері інтелектуалізації інформаційних технологій — побудови систем автономного керування складними об'єктами та процесами у динамічному середовищі, та сформулювати обґрунтований підхід до підвищення рівня інтелектуалізації процесів прийняття рішень у таких системах

## **НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ ТА АВТОНОМНІСТЬ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМАХ**

Автономні системи повинні бути здатними виконувати функції керування в автономному режимі, тобто за комунікаційних обмежень та відсутності людини-оператора. Тому дослідження різних аспектів побудови та функціонування цих систем мають великий інтерес з точки зору можливої синергії методів штучного інтелекту, прийняття рішень та інтелектуального керування. Це дасть можливість переходу від автоматичних систем, що діють у відповідності із заздалегідь заданими алгоритмами та процедурами, до нового класу систем,

здатних у процесі своєї автономної роботи здійснювати певний набір інтелектуальних функцій. У цьому контексті необхідно звернути увагу на важливу відмінність між традиційними та інтелектуалізованими системами керування. Поведінка традиційних систем керування, як правило, повністю визначається сукупністю заданих диференціальних рівнянь, що у векторній формі може бути записано таким чином:

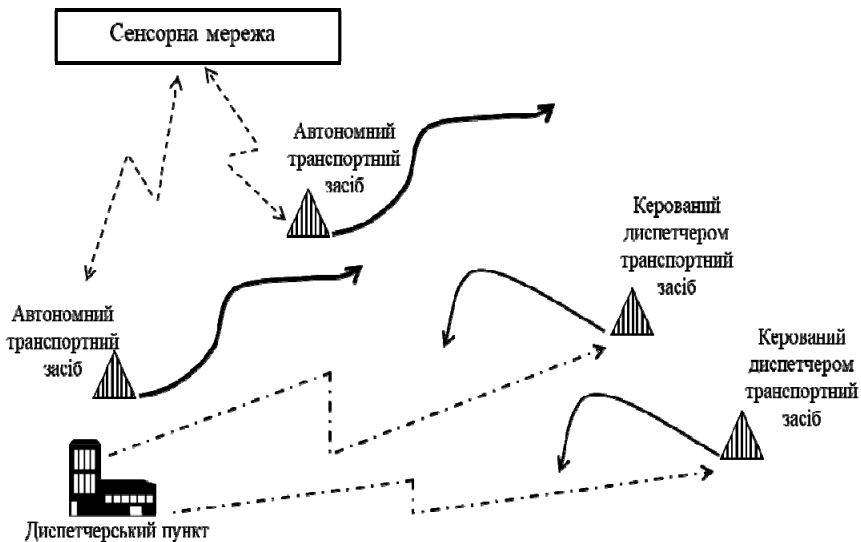
$$\dot{Y} = F(X, Y) + D(t),$$

де  $F$  — деяка векторна функція;  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$  — вектор вихідних змінних, що можуть бути виміряні;  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$  — вектор вихідних змінних, що не можуть бути виміряні;  $D(t)$  — змінний у часі збурювальний вплив на систему. До того ж цільова функція системи вважається заздалегідь заданою, а невизначеність ситуації зумовлюється відсутністю повної інформації щодо вектору фазового стану та неточністю вимірювання поточних параметрів. Ще одним важливим фактором, який необхідно враховувати у побудові складних систем, є нелінійність. Слід зазначити, що наявність нелінійних елементів навіть у порівняно простих рівняннях призводить до неможливості їхнього розв'язання у квадратурах. Інакше кажучи, немає можливості подати загальне рішення набору нелінійних диференціальних рівнянь у вигляді аналітичних співвідношень та невизначених інтегралів. Тому основним практичним засобом вирішення таких проблем є евристичний метод послідовного перебору можливих варіантів. Принципова відмінність інтелектуальних систем полягає у можливості їхньої цілеспрямованої поведінки навіть у разі інформаційних обмежень, наприклад, за відсутності повної інформації про вид функції  $F(X, Y)$  чи в ситуаціях, коли неможливе точне вимірювання вектору  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ . Навіть більше, невизначеність у таких системах може включати не лише неточно визначені параметри, але й не повністю сформульовану мету. У зв'язку з цим допускається можливість уточнення величин параметрів та корегування цілей безпосередньо під час функціонування системи.

Отже, інтелектуальні системи повинні імітувати осмислену поведінку людини — зокрема за умов відсутності повної інформації. Інакше кажучи, вони повинні бути здатними «усвідомлювати» характерні особливості поточної ситуації та зовнішнього середовища, складати плани дій, формувати та ухвалювати рішення, реалізовувати прийняті рішення та оцінювати отримані результати. Важливою умовою побудови інтелектуальних систем є забезпечення достатнього ступеню автономності їхньої поведінки. Водночас доцільно вирізняти два принципово відмінних рівня автономності. На першому з них забезпечується автономність дій з досягнення певного набору цілей  $G = \{g_1, g_2, \dots, g_r\}$ , які є заздалегідь визначеними та, як правило, сформованими за межами системи. У такому випадку головна увага розробника зосереджується на створенні автономних засобів забезпечення «найкращого» (у якомусь визначеному сенсі) шляху досягнення поставлених цілей. Питання же про те, на підставі яких міркувань та за допомогою яких процедур здійснюється формування цих цілей, звичайно зовсім не розглядається. Другий рівень автономності передбачає значне посилення інтелектуальних можливостей системи за рахунок її здатності до автономного

формулювання або усіх своїх цілей, або їх деякої підмножини  $G_2 \subset G$ . Процес автономного формулювання цілей складається з двох етапів — етапу генерування множини можливих цілей  $G_1 = \{g_1, g_2, \dots, g_s\}$  та етапу вибору підмножини цілей  $G_2 = \{g_1, g_2, \dots, g_v\}, v \leq s$ . Основними рисами цілеспрямованої поведінки інтелектуальних систем, що зумовлюють спектр їхніх функційних можливостей, є такі. По перше, ці системи здатні імітувати виконання людиною таких завдань, які можна назвати інтелектуальними. До них слід віднести, зокрема, образне сприйняття окремих компонентів поточної ситуації або ситуації в цілому; усвідомлення причин виникнення тієї чи іншої поточної ситуації; генерування можливих варіантів дій; попереднє планування шляхів реагування на можливі наслідки дій; прийняття рішення щодо найдоцільнішого варіанту дій. Другим складником функційних можливостей таких систем є їхня здатність до автономної роботи. Взагалі кажучи, інтелектуальні системи можуть функціонувати або як інтерактивні, або як повністю автономні. До того ж автономність системи може проявлятися як у реактивних, так і у проактивних стратегіях цілеспрямованої поведінки. Наприклад, у випадку автономного керування групою взаємодією рухомих об'єктів у конфліктних ситуаціях, на базі реактивних стратегій можна адекватно реагувати на виникнення тимчасових комунікаційних обмежень, які перешкоджають інформаційному обміну з іншими учасниками групи. Використання проактивних стратегій спрямоване на забезпечення ефективного функціонування навіть за умов повної відсутності зв'язку між сторонами чи з наземним диспетчерським пунктом. Отже, застосування проактивного підходу може забезпечити автономну роботу систем без необхідності безпосереднього втручання оператора, усуваючи тим самим можливість негативного впливу людського фактору на якість функціонування. Ще одним важливим чинником успішного функціонування інтелектуальних систем є можливість ефективної адаптації як до зміни зовнішніх умов, так і до зміни внутрішнього стану системи.

Аналіз сучасного стану проблеми показує, що наразі одним з найперспективніших напрямів інтелектуалізації є застосування елементів штучного інтелекту для побудови автономних систем, профільованих для роботи у порівняно вузьких предметних областях. Однією з суттєвих переваг спрямованості таких систем на вирішення спеціалізованих завдань є можливість забезпечення їхньої якісної адаптації як до змін у зовнішньому середовищі, так і до змін у структурній організації та значеннях кількісних параметрів самої системи. Системи з елементами штучного інтелекту можуть діяти як автономно, так і входити до складу інтегрованих людино-машинних комплексів та працювати в інтерактивному режимі. Але і в цьому випадку їхньою принциповою відмінністю від традиційних систем підтримки прийняття рішень є те, що вони допомагають людині в аналізі інтелектуальних проблем не лише за рахунок сприяння кращому усвідомленню особливостей та взаємозв'язків поточної ситуації, а й шляхом автономного, без безпосередньої участі людини, виконання деяких фрагментів загального завдання. Наприклад, якщо метою системи є диспетчеризація руху транспортних засобів, то за допомогою елементів штучного інтелекту можна здійснювати автономну навігацію деяких з цих засобів та інформувати диспетчера щодо динаміки їхніх основних маршрутних параметрів.



**Рис. 1.** Приклад застосування штучного інтелекту та автономної навігації для диспетчеризації руху транспортних засобів у складному середовищі

На основі одержаної інформації диспетчер може керувати траєкторіями руху решти транспортних засобів та здійснювати керування розвитком ситуації в цілому (див. рис. 1).

## ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ ТА ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ У ЗАВДАННЯХ КЕРУВАННЯ

Аналіз ранніх робіт у галузі штучного інтелекту показує, що дослідники, які започаткували цей науковий напрям, розраховували на можливість швидкого застосування загальних концептуальних та методологічних положень для створення комп'ютеризованих технічних засобів, спроможних вирішувати широкий спектр теоретичних та прикладних проблем. Однією з таких проблем є забезпечення прийняття обґрунтованих та своєчасних рішень у складних ситуаціях, що виникають у різних предметних галузях. Передбачалося, що вбудовані у відповідні технічні засоби елементи універсального штучного інтелекту будуть об'єднувати у єдине ціле такі складники процесу ухвалення рішень, як сприйняття наявної інформації, усвідомлення головних складнощів та пошук доцільних шляхів їх подолання, формування можливих альтернатив та вибір найприйнятнішого варіанту дій. Але ці оптимістичні очікування щодо перспектив застосування універсального штучного інтелекту у більшості випадків не справдилися. Більш продуктивним підходом виявився такий, коли окремі складники інтелектуальної поведінки у прийнятті рішень досліджувалися значною мірою незалежно одна від одної, використовуючи для цього різні методи штучного інтелекту. Огляд літературних джерел свідчить про те, що наразі найбільше застосування мають такі напрями штучного інтелекту: нейронні мережі; нечітка логіка; генетичні та еволюційні методи; інтелектуальні агенти і мультиагентські системи; експертні і базовані на знаннях системи; машинні алгоритми навчання. У роботі [8] наведений огляд використання методів

штучного інтелекту для вирішення низки прикладних завдань у різноманітних галузях.

Аналіз наведених відомостей дає змогу зробити висновок, що значний відсоток зазначених прикладних завдань є безпосередньо або опосередковано пов'язаним з процесами прийняття рішень, зокрема, з такими їхніми складниками, як моніторинг, діагностування, планування, вибір. Ці складники також є етапами функціонування систем інтелектуального керування, зокрема, такого їхнього важливого різновиду, як системи автономного керування складними об'єктами та процесами у динамічному середовищі. Тому інтелектуалізація прийняття рішень має великі можливості щодо підвищення ефективності керування зазначеними об'єктами та процесами. Але для реалізації цих можливостей необхідно, перш за все, усвідомити специфічні особливості прийняття рішень у подібних системах. Головними з цих особливостей, на думку авторів, є такі: ситуації, що виникають під час функціонування систем інтелектуального керування, звичайно є складними для аналізу; складність аналізу поточних ситуацій часто доповнюється необхідністю швидких дій; навіть поодинокі випадки помилкових рішень можуть призвести до непередбачуваних наслідків.

Наявний досвід розв'язання реальних завдань керування складними динамічними об'єктами та процесами показує, що, навіть за використання сучасних потужних комп'ютерів часто неможливо у реальному часі прийняти рішення про найдоцільнішу структуру та параметри керування шляхом безпосереднього перебору усіх можливих альтернативних варіантів. Тому штучний інтелект є потенційно дуже потужним засобом, що може забезпечити належну швидкість прийняття необхідних рішень навіть у виключно складних умовах. Але водночас необхідно враховувати, що процеси та механізми прийняття рішень з використанням елементів штучного інтелекту можуть суттєво відрізняються від процесів та механізмів прийняття рішень людиною. Для усвідомлення цих відмінностей потрібно, зокрема, зрозуміти, яким чином за допомогою штучного інтелекту оцінюються ситуації, формуються альтернативи та вибирається найдоцільніший варіант дій. У випадках прийняття групових рішень є необхідним також розуміння того, як відбувається узгодження рішень між різними учасниками та сприйняття ними наслідків цих рішень.

Аналіз складників процесу прийняття рішень у системах керування складними об'єктами та процесами дає змогу виокремити його основні етапи (рис.2):

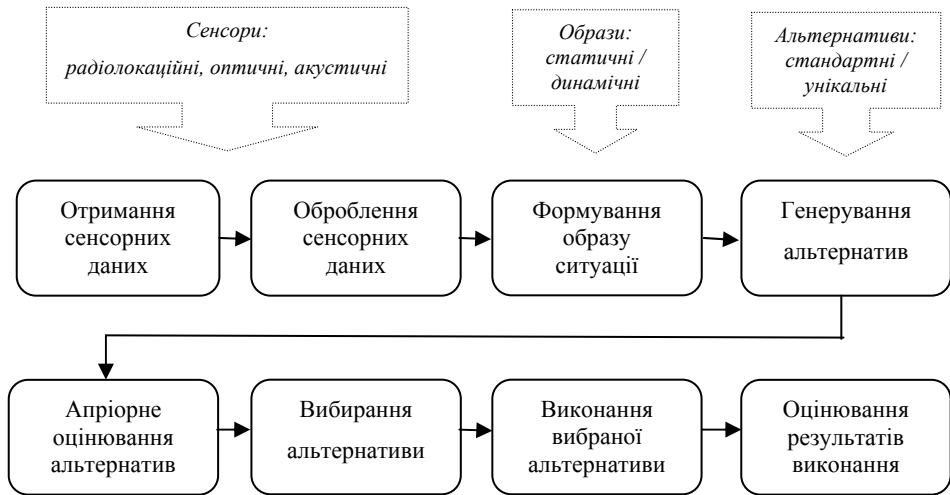
1) отримання від сенсорів та сенсорних мереж даних, що характеризують як стан зовнішнього середовища, так і стан внутрішніх ресурсів системи керування;

2) оброблення даних, отриманих від сенсорів та сенсорних мереж;

3) усвідомлення характерних особливостей поточної ситуації та формування її інформаційного образу;

4) генерування можливих альтернативних варіантів дій (перший етап планування необхідних дій);

5) апіорне оцінювання альтернативних варіантів дій (другий етап планування необхідних дій);



**Рис. 2.** Основні етапи процесу прийняття рішень в інтелектуалізованих системах керування

- 6) вибирання найдоцільнішого альтернативного варіанту дій;
- 7) виконання вибраного варіанту дій;
- 8) апостеріорне оцінювання результатів виконання вибраного варіанту дій.

Для визначення того, яким чином штучний інтелект може допомогти на тому або іншому етапі прийняття рішень, необхідно створити та дослідити підходи до використання елементів штучного інтелекту на цих етапах.

## СЕНСОРНІ МЕРЕЖІ В СИСТЕМАХ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ

Основним джерелом інформації у сучасних системах є оброблення даних, отриманих від різних типів давачів (радіолокаційних, оптичних, акустичних та ін.). Удосконалення технології виробництва таких пристроїв привело до суттєвого поліпшення їхніх експлуатаційних характеристик за одночасним зменшенням ваги та габаритів. Розроблення ефективних методів поєднання окремих давачів у сенсорні мережі дало змогу отримувати великі обсяги різноманітних даних щодо стану та особливостей зовнішнього середовища. Це має особливе значення для побудови систем інтелектуального керування, які повинні не лише ефективно функціонувати у складному та змінному середовищі, а й мати здатність певним чином впливати на стан цього середовища. Зазначимо, що наразі створення інтелектуального середовища стає одним з перспективних напрямів удосконалення сучасних систем. Так, у роботі [9] робиться висновок щодо значного потенціалу використання сенсорних мереж для створення нових типів систем, які будуть здатні не лише виявляти певні події та належним чином реагувати на них, але й активно впливати на зовнішнє середовище. Подібний вплив спрямовано на інтелектуалізацію тих або інших компонентів цього середовища, підвищуючи загальний рівень інтелектуальності системи. Отже, однією з принципових відмінностей процесу прийняття рішень у автономному керуванні від традиційного процесу прийняття рішень є особлива важливість наявності потужних сенсорів та сенсорних мереж, що забезпечують отри-

мання інформації як про зовнішнє середовище, так і про стан внутрішніх ресурсів системи. Саме наявність необхідних даних, а також можливість їх вчасного оброблення для усвідомлення характерних особливостей поточної ситуації, є критичними факторами для побудови ефективних систем автономного керування складними об'єктами та процесами.

Сенсорні мережі є потужним засобом отримання великих обсягів складно структурованих даних, особливо необхідних на таких етапах інтелектуальної поведінки, як усвідомлення стану зовнішнього середовища та аналіз результатів. Під час цих етапів відбувається трансформація даних та інформації у знання щодо різних аспектів поточної ситуації. Методи штучного інтелекту можуть стати в нагоді як для формування, так і для комбінування та відображення тих або інших компонентів знань. Ще ширше застосування штучний інтелект може знайти на етапах формування альтернативних варіантів дій та прийняття рішення про найдоцільніший варіант. Використання елементів штучного інтелекту на цих етапах має на меті вироблення ефективних засобів генерування та ухвалення рішень. Для досягнення цього необхідно проаналізувати суттєві взаємозв'язки методології штучного інтелекту та сучасних теорій прийняття рішень, а також створити механізми їх взаємоузгодженого використання та можливої інтеграції. Слід також зазначити, що нелінійна динаміка об'єктів та процесів керування зумовлює складність аналізу їх функціональної поведінки. Іноді навіть застосування нелінійних моделей не дає змогу з достатньою повнотою описувати такі об'єкти та процеси. Один з можливих засобів подолання вказаних перешкод базується на набутому досвіді успішних дій у подібних складних середовищах. Цей напрям формування та використання знань знайшов відображення у побудові експертних систем.

### **ВИКОРИСТАННЯ ОБРАЗІВ ПОТОЧНОЇ СИТУАЦІЇ ДЛЯ ПЛАНУВАННЯ ДІЙ**

Перспективним підходом до побудови інтерактивних систем керування складними динамічними об'єктами та процесами є формування образів, що відображають інформацію щодо суттєвих складників зовнішнього середовища та їхніх найважливіших взаємозв'язків. За рахунок цього можливе створення структури процесу прийняття рішень, яка базується на усвідомленні та використанні таких інформаційних образів поточної ситуації. Ці образи, що підкреслюють її найхарактерніші властивості, можуть мати вигляд аналітичних або структурних моделей, чи навіть подаватися у вербальній формі. У такому випадку основною функцією цілісної інтелектуальної системи є інтеграція суб'єктивних суджень (наприклад, щодо обмежень на застосування наявних моделей) і результатів оперування цими моделями. Образи поточної ситуації можуть застосовуватися на різних етапах процесу прийняття рішень — для знаходження невідповідності між складниками отриманої інформації, для здійснення генерації альтернатив, для підтримки процесу вибору найприйнятнішої альтернативи, для здійснення апріорного та апостеріорного аналізу результатів впровадження вибраної альтернативи, для планування необхідних корегувальних дій.

Планування в інтерактивних системах здійснюється в процесі відповідним чином організованої людино-машинної взаємодії. На противагу цьо-

му, формування планів дій в системах штучного інтелекту повинно відбуватися в автономному режимі. Зазначимо, що автономне планування є перспективною науковою галуззю, у якій може бути розроблено низка передових технологій та систем. Одним з найважливіших напрямів досліджень у галузі автономного планування є інтеграція процесів формування та виконання дій. Для забезпечення подібної інтеграції є необхідним адекватне оцінювання динаміки поточної ситуації, що можливо лише за рахунок розуміння структурних особливостей процесів міркування та їх застосування для побудови автономної системи. Під час планування в інтерактивних системах підтримку цього процесу здійснюють за рахунок генерування інформаційних образів поточної ситуації та їхнього відображення у формі, що є найприйнятнішою для людини, яка ухвалює рішення. У цьому випадку слід вирізняти застосування образів для підтримки процесу швидкого внесення коректив у вибрані плани (динамічне перепланування) від застосування образів для підтримки процесу поступового внесення коректив у вибрані плани (еволюційне перепланування). На рис. 3 та 4 наведено приклади використання образу поточної ситуації для, відповідно, динамічного та еволюційного перепланування траєкторії руху транспортного засобу.

Отже, системи інтелектуального керування можуть функціонувати як у режимі людино-машинної взаємодії, так і в автономному режимі. Кожен із зазначених режимів має свої особливості, що визначає доцільність використання того чи іншого інформаційного образу у тих чи інших ситуаціях. Водночас в обох випадках цілі керування визначаються або безпосередньо людиною чи групою людей, або в процесі взаємодії комп'ютерних засобів з людиною чи групою людей.

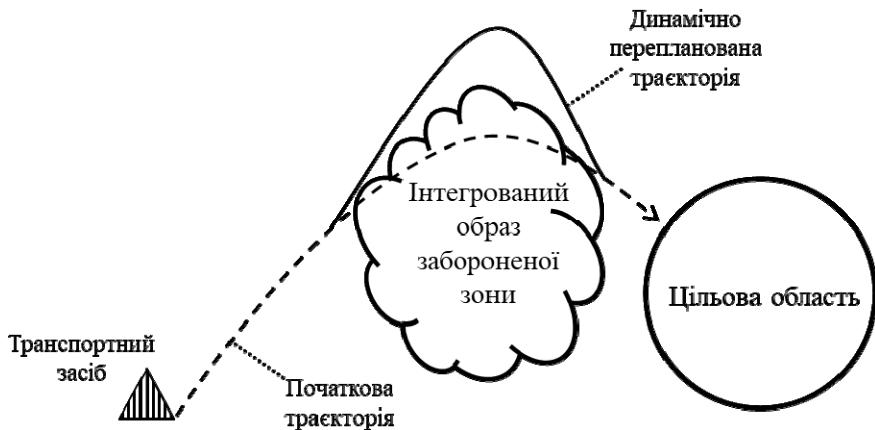


Рис. 3. Приклад використання образу поточної ситуації для динамічного переplanування траєкторії руху транспортного засобу

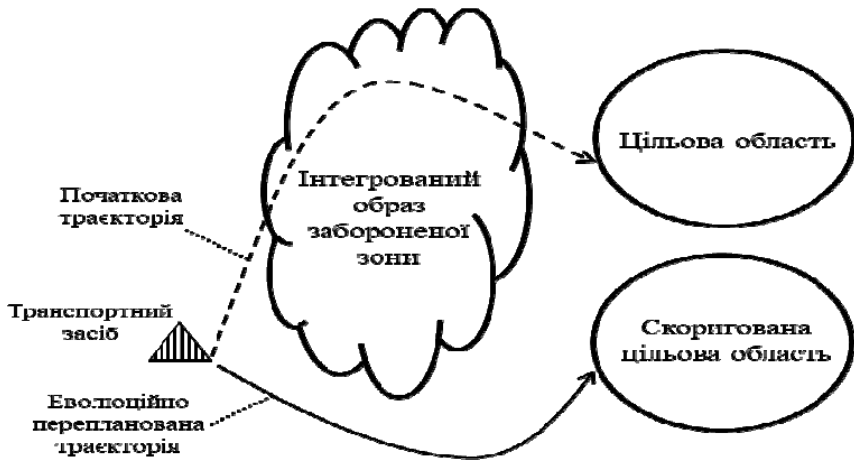


Рис. 4. Приклад використання образу поточної ситуації для еволюційного перепланування траєкторії руху транспортного засобу

Досягнення же поставлених цілей можливо як за допомогою інтерактивних, так і за допомогою автономних інтелектуальних систем. Під час здійснення інтелектуальної діяльності людиною деякі з етапів узагальненого процесу прийняття рішень (такі, наприклад, як усвідомлення поточної ситуації чи формування альтернатив) можуть виконуватися підсвідомо, використовуючи набуті раніше знання та досвід поведінки у подібних обставинах. Але і в цьому випадку формування та використання деяких узагальнених формалізованих образів поточної ситуації (наприклад, застосування інтегрованих областей безпечних маневрів для вирішення проблем попередження зіткнень та інших навігаційних завдань) можуть суттєво допомогти в аналізі складних конфліктних ситуацій у режимі реального часу. Для автономних систем з елементами штучного інтелекту формалізовані образи поточної ситуації є невід’ємним компонентом підготовки та виконання дій, які можуть трактуватися стороннім спостерігачем як інтелектуальні. До того ж конкретні механізми здійснення інтелектуальної поведінки людиною та системами з елементами штучного інтелекту можуть суттєвим чином відрізнятися. Однак отримані результати і в тому, і в іншому випадку можуть бути певною мірою ідентичними — тобто такими, що дають змогу успішно вирішувати проблеми, які за своєю сутністю є інтелектуальними.

Формування образів поточної ситуації є першим кроком на шляху побудови методів та моделей автономного образного мислення та їхнього використання для розв’язання завдань інтелектуального керування. Здатність до власного образного мислення уможливорює надання інтелектуалізованій системі таких властивостей: можливість ефективно діяти у непередбачуваних та швидкоплинних ситуаціях, достатню надійність роботи у шкідливих та агресивних середовищах, належний рівень адаптації як до змін зовнішньої обстановки, так і до змін у структурі та параметрах самої системи. Ґрунтуючись на використанні вищенаведених властивостей, можливо забезпечити якість та стійкість керування навіть у найнесприятливіших ситуаціях, наприклад, за умов обмеженості матеріальних ресурсів, дефіциту часу, а також неповноти наявної інформації.

Важливим фактором образного мислення є цілісне сприйняття явищ і процесів на основі побудови, подання та усвідомлення їх інтегральних інформаційних образів. Тому моделі образного мислення можуть бути основою врахування істотних взаємозв'язків між цільовими настановами, об'єктом та середовищем з метою створення ефективних систем інтелектуального керування.

## ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕДУРИ ВИБОРУ В АВТОНОМНИХ СИСТЕМАХ

Важливою передумовою вирішення проблеми інтелектуалізації процесу прийняття рішень в автономних системах є вироблення шляхів інтелектуалізації процедури вибору найприйнятнішої альтернативи. На відміну від інтерактивних систем, де вибір здійснюється у ході належним чином організованої процедури людино-машинного діалогу, автономні системи повинні здійснювати вибір автоматично. Для цього необхідним є розроблення моделей штучного інтелекту для оцінювання та вибирання альтернатив у різних можливих ситуаціях та за різних рівнів інформаційних обмежень. У тому випадку, якщо такі моделі ґрунтуються на створенні та використанні інформаційних образів, можна сформулювати деякі додаткові вимоги до їхньої структури та властивостей. Такі інформаційні образи повинні не лише адекватно відображати істотні, часто замасковані та складні для розуміння аспекти поточної ситуації, а й забезпечувати можливість для порівняно легкого оперування різними компонентами образів. Це завдання виконують алгоритми фільтрації інформації, які визначають, які аспекти поточної ситуації доцільно включити до складу інформаційних образів та яка форма подання тих або інших компонентів образів є найприйнятнішою. Необхідно також виконувати аналіз чутливості компонентів інформаційних образів до можливих змін характеристик поточної ситуації.

Процедуру вибирання в автономних системах доцільно розглядати як таку, що складається з трьох послідовних етапів. На першому з них початкова множина альтернатив  $A_I$  розбивається на дві множини  $A_1$  та  $A_2$ , для яких мають місце такі співвідношення:

$$A_1 \cup A_2 = A_I; A_1 \cap A_2 = \emptyset,$$

де  $A_1$  — множина альтернатив, які за будь-яких обставин нездатні забезпечити досягнення вищевказаних наборів цілей  $G_1 = \{g_1, g_2, \dots, g_r\}$  чи  $G_2 = \{g_1, g_2, \dots, g_v\}$ ;  $A_2$  — множина альтернатив, які потенційно зможуть забезпечити досягнення визначених цілей.

На другому етапі множина альтернатив  $A_2$  звужується спочатку до множини припустимих альтернатив  $A_R \subset A_2$ , які задовольняють наявному набору поданих у формалізованому вигляді обмежень. Після цього здійснюється подальше звуження до множини альтернатив  $A_E \subset A_R$ , які не домінуються за Парето. У ході третього етапу здійснюється вибирання найприйнятнішої у поточній ситуації альтернативи  $a \in A_R$ .

Підсумовуючи вищевикладене, можна стверджувати, що інтелектуалізована автономна система повинна мати здатність ефективно діяти за умов інформаційних обмежень та у не повністю визначеному зовнішньому сере-

довищі, що до того ж постійно змінюється. Засоби адаптації до зміни умов функціонування ґрунтуються на досвіді вирішення інших, але подібних за деякими ознаками, проблем. Адаптаційні механізми спрямовано на врахування як динаміки зовнішнього середовища, так і зміни параметрів і/або структури самої системи. Для цього необхідно прогнозувати вірогідні зміни середовища, а також оцінювати вплив цілеспрямованих дій на майбутній стан системи керування.

## ВИСНОВКИ

Взаємоузгоджене застосування моделей штучного інтелекту та інформаційних образів поточної ситуації є ефективним засобом інтелектуалізації процесів прийняття рішень у системах керування.

Образне сприйняття суттєвих взаємозв'язків може використовуватися на різних етапах процесу прийняття рішень – для автоматичної генерації альтернатив, розуміння невідповідності між різними джерелами даних, здійснення процедури вибору, оцінювання результатів застосування тієї або іншої альтернативи.

Важливим моментом застосування штучного інтелекту в інтерактивних системах є можливість надавати пояснення користувачу щодо обґрунтованості прийняття тих або інших рішень.

Необхідною умовою забезпечення автономного функціонування у випадках дефіциту часу та наявності великої кількості альтернативних варіантів дій є швидка адаптація до змін у зовнішньому середовищі, а також до можливої модифікації короткострокових та довгострокових цілей.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Mertoguno J.S. Human decision making model for autonomic cyber systems. *International Journal on Artificial Intelligence Tools*. 2014. Vol. 23. № 6. URL: <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0218213014600239>.
2. Gonzales D., Harting S. Designing unmanned systems with greater autonomy. *RAND Corporation Research Report*, Santa Monica, CA, USA. 2014. URL: [https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research\\_reports/RR600/RR626/RAND\\_RR626.pdf](https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research_reports/RR600/RR626/RAND_RR626.pdf).
3. Bradshaw J.M., Hoffman R.R., Johnson M., Woods D.D. The seven deadly myths of "autonomous systems". *IEEE Intelligent Systems*. 2013. Vol. 28. №3. P. 54–61.
4. Groumpos P.P. Complex systems and intelligent control: issues and challenges. *IFAC Proceedings Volumes*. 2001. Vol. 34. №8. P. 29–36. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667017407907>.
5. Artificial Intelligence (AI): What is it and how does it work? URL: <https://www.lexology.com/library/detail.aspx?g=5424a424-c590-45f0-9e2a-ab05daff032d>.
6. Schubert J., Brynielsson J., Nilsson M., Svenmarck Artificial intelligence for decision support in command and control systems. *Proceedings of the 23rd International Command and Control Research & Technology Symposium "Multi-Domain C2"*, Pensacola, FL, USA. 2018. URL: [https://www.researchgate.net/publication/330638139\\_Artificial\\_Intelligence\\_for\\_Decision\\_Support\\_in\\_Command\\_and\\_Control\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/330638139_Artificial_Intelligence_for_Decision_Support_in_Command_and_Control_Systems).
7. Cunneen M., Mullins M., Murphy F. Autonomous vehicles and embedded artificial intelligence: the challenges of framing machine driving decisions. *Applied Artificial Intelligence*. 2019. Vol. 33. №8. P. 706–731.

8. Phillips-Wren G. AI tools in decision making support systems: a review. *International Journal on Artificial Intelligence Tools*. 2012. Vol. 21. № 2. URL: [https://www.researchgate.net/publication/235705583\\_Ai\\_Tools\\_in\\_Decision\\_Making\\_Support\\_Systems\\_a\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/235705583_Ai_Tools_in_Decision_Making_Support_Systems_a_Review).
9. Petitti A., Di Paola D. A network of stationary sensors and mobile robots for distributed ambient intelligence. *IEEE Intelligent Systems*. 2016. Vol. 31. №6. P. 28–34.

Отримано 04.04.2021

## REFERENCES

1. Mertoguno J.S. Human decision making model for autonomic cyber systems. *International Journal on Artificial Intelligence Tools*. 2014, Vol. 23, № 6. URL: <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0218213014600239>. – Title from the screen.
2. Gonzales D., Harting S. Designing unmanned systems with greater autonomy. *RAND Corporation Research Report*, Santa Monica, CA, USA, 2014. URL: [https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research\\_reports/RR600/RR626/RAND\\_RR626.pdf](https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research_reports/RR600/RR626/RAND_RR626.pdf). – Title from the screen.
3. Bradshaw J.M., Hoffman R.R., Johnson M., Woods D.D. The seven deadly myths of "autonomous systems". *IEEE Intelligent Systems*. 2013, Vol. 28, № 3, pp. 54–61.
4. Groumpos P.P. Complex systems and intelligent control: issues and challenges. *IFAC Proceedings Volumes*. 2001, Vol. 34, №8, pp. 29–36. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667017407907>. – Title from the screen.
5. Artificial Intelligence (AI): What is it and how does it work? URL: <https://www.lexology.com/library/detail.aspx?g=5424a424-c590-45f0-9e2a-ab05daff032d>. – Title from the screen.
6. Schubert J., Brynielsson J., Nilsson M., Svenmarck P. Artificial intelligence for decision support in command and control systems. *Proceedings of the 23rd International Command and Control Research & Technology Symposium "Multi-Domain C2"*, Pensacola, FL, USA, 2018. URL: [https://www.researchgate.net/publication/330638139\\_Artificial\\_Intelligence\\_for\\_Decision\\_Support\\_in\\_Command\\_and\\_Control\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/330638139_Artificial_Intelligence_for_Decision_Support_in_Command_and_Control_Systems). – Title from the screen.
7. Cunneen M., Mullins M., Murphy F. Autonomous vehicles and embedded artificial intelligence: the challenges of framing machine driving decisions. *Applied Artificial Intelligence*. 2019, Vol. 33, №8, pp. 706–731.
8. Phillips-Wren G. AI tools in decision making support systems: a review. *International Journal on Artificial Intelligence Tools*. 2012, Vol. 21, №2. URL: [https://www.researchgate.net/publication/235705583\\_Ai\\_Tools\\_in\\_Decision\\_Making\\_Support\\_Systems\\_a\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/235705583_Ai_Tools_in_Decision_Making_Support_Systems_a_Review). – Title from the screen.
9. Petitti A., Di Paola D. A network of stationary sensors and mobile robots for distributed ambient intelligence. *IEEE Intelligent Systems*. 2016, Vol. 31. №6, pp. 28–34.

Received 04.04.2021

*Shepetukha Yu.M.*, PhD (Engineering), Senior Researcher,  
Leading Researcher of the Intelligent Control Department  
ORCID: 0000-0002-6256-5248

e-mail: yshep@meta.ua

*Volkov O.Ye.*, PhD (Engineering),  
Head of the Intelligent Control Department  
ORCID: 0000-0002-5418-6723

email: alexvolk@ukr.net

*Komar M.M.*, PhD (Engineering)  
Senior Researcher of the Intelligent Control Department  
ORCID: 0000-0002-0119-0964

e-mail: nickkomar08@gmail.com

## INTELLECTUALIZATION OF DECISION MAKING PROCESSES IN AUTONOMOUS CONTROL SYSTEMS

**Introduction.** Scientific-technical level of any country in a modern world is mainly determined by a current state and development rate of informational technologies. At the same time, the main avenue of information technologies' improvement is their intellectualization. Due to intellectualization, it became possible to create advanced systems with principally novel functional capabilities, in particular, high-speed computer systems able to autonomous actions in a complex and dynamic environment. Control means for complex objects and processes play an important role in the operation of autonomous systems. Therefore, the study of theoretical as well as applied issues of such systems' construction is an important scientific and engineering problem.

**The purpose** of the paper is to examine both current state and development prospects of a new direction in the area of intelligent information technologies – the elaboration of autonomous control systems for complex objects and processes in a dynamic environment; to formulate a well-grounded approach for the increase in intellectualization level of decision processes in such systems.

**Methods.** The development of autonomous control systems, as well as the increase in decision making processes' intellectualization level in such systems, is based on the usage of the following conceptual, theoretical and methodological instruments: the theory of informational technologies' intellectualization, the methodology of intelligent control, the theoretical fundamentals of artificial intelligence systems' construction, decision making methods, the methodology of image-based reasoning, methods for simulation of image-based comprehension of environment.

**Results.** An approach for the consistent usage of methods of artificial intelligence, decision making and intelligent control aimed at the development of autonomous means for the control of complex objects and processes has been examined. Appropriateness of creation of the systems profiled for operations in designated problem domains has been grounded. Both specific features and components of the framework for decision making in intelligent control systems have been determined. Both necessity of the creation of intelligent environment and important role of sensor networks have been stressed. Methodology for the construction of informational images, which represent the most important components of a current situation, has been proposed. Examples of the usage of informational images for performing both dynamic and evolutionary re-planning have been considered.

**Conclusions.** A reasonable way for the development of intelligent control systems is the one that provides a consistent usage of different types of models. Image-based representation of a current situation's essential interconnections is an efficient instrument for the intellectualization at different stages of decision making processes — alternative generation, understanding of inconsistencies among different data sources, execution of choice procedure, evaluation of results. The application of artificial intelligence elements for decision making in autonomous systems is especially well-grounded in cases of time shortage as well as availability of a great number of existing alternatives.

**Keywords:** *intellectualization of information technologies, intelligent control, decision making, autonomy, artificial intelligence, image, uncertainty, adaptation.*

# Medical and Biological Cybernetics

---

DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt204.02.064>

UDC 534.7: 612.2

**FAINZILBERG L.S.<sup>1</sup>**, DSc (Engineering), Professor,  
Chief Researcher of the Intelligent Automatic Systems Department  
ORCID: 0000-0002-3092-0794  
e-mail: fainzilberg@gmail.com

**SOLOVEY S.R.<sup>2</sup>**,  
Student Faculty of Biomedical Engineering,  
e-mail: maximum.lenovo.ml@gmail.com

<sup>1</sup> International Research and Training Center  
for Information Technologies and Systems of  
the National Academy of Sciences of Ukraine  
and Ministry of Education and Science of Ukraine,  
40, Acad. Glushkova av., Kyiv, 03187, Ukraine,

<sup>2</sup> The National Technical University of Ukraine  
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"  
37, Peremohy av., Kyiv, 03056, Ukraine

## SELF-LEARNING INFORMATION TECHNOLOGY FOR DETECTING RESPIRATORY DISORDERS IN HOME CONDITIONS

---

**Introduction.** In connection with the COVID-19 pandemic, it is important to start treatment promptly in case of a threat of developing viral pneumonia in a patient. The solution to this problem requires the creation of new means for detecting respiratory disorders with a minimum probability of "missing the target". At the same time, it is equally important to minimize visits to medical institutions by healthy patients because of the danger of their contact with possible carriers of coronavirus infections, that is, to minimize the likelihood of a "false alarm".

**Purpose of the article** is to develop a method that allows a patient to signal at home about the advisability of contacting a medical institution for an in-depth examination of the respiratory system, and to assess the possibility of implementing this method on a smartphone using a built-in microphone.

**Methods.** A distinctive feature of the proposed approach lies in the construction of a personalized standard of normal respiratory respiration for a particular patient based on self-learning from a finite sample of observations at home and in comparison, based on original computational algorithms of phonospirograms of sound signals of the following observations with the standard.

**Results.** A prototype of information technology has been developed that will provide home alarms about possible respiratory disorders, requiring consultation with a doctor and the need for an in-depth medical examination.

© FAINZILBERG L.S., SOLOVEY S.R., 2021

**64** ISSN 2663-2586 (Online), ISSN 2663-2578 (Print). Cyb. and Comp. Eng. 2021. № 2 (204)

*It is shown that the construction of a personalized standard of normal breathing can be carried out based on the use of a set of original computational procedures for a finite sample of realizations, independently registered by the user using a microphone built into a smartphone. The algorithm for constructing a standard is based on digital processing of a matrix of paired distances between phonospirograms of the final training sample of observations.*

**Conclusions.** *A software application that provides the implementation of the proposed computational procedures can be implemented on a smartphone of average performance running the Android operating system.*

**Keywords:** *respiratory noises, intelligent IT, computational procedures, smartphone.*

## INTRODUCTION

The method of auscultation (listening to respiratory noises) has been used in medical practice for the diagnosis of respiratory diseases for over 200 years. According to modern concepts, sound phenomena that carry information about functional disorders of the respiratory system arise in the larynx and trachea as a result of turbulent air movement [1, 2]. Sound vibrations are transmitted to the chest at the location of the stethoscope and form various types of breathing noises, the subjective analysis of which allows the doctor to assess the state of the respiratory system and carry out differential diagnostics of a number of diseases.

It is clear that the subjective analysis of breathing sounds significantly depends on the doctor's experience and does not allow obtaining objective quantitative characteristics of breathing noises [3]. In the middle of the last century, automated systems for assessing respiratory sounds appeared in clinical practice, which provided support for making diagnostic decisions [4–6].

The first such systems used only analog electronics (microphones, amplifiers, oscilloscopes and tape recorders), with the help of which it was possible for the first time to register respiratory sounds arising from breathing. These studies made it possible to formulate basic concepts and determine the main classes of respiratory noise in a healthy person and in pathologies that are still used by pulmonologists.

The development of digital computing technology has laid the foundation for computer systems for analyzing breathing sounds [7], which use special sensors with high sensitivity in a wide frequency range, including frequencies that are not audible with a stethoscope. One of the examples of such systems is the domestic phonospirograph Kora-03MI, developed at the Institute of Hydromechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine. With the help of it, by the methods of spectral-temporal analysis, it was possible to objectify the assessment of complex sound signals on the basis of original auscultatory signs [8, 9].

Undoubtedly, the use of such software and hardware complexes in medical practice significantly increases the reliability of diagnostic solutions. At the same time, another class of information technologies for processing breathing sounds is also required. The nature of the course of a number of diseases presupposes a distributed system of health services delivery, when home supervision and treatment becomes important. Note that bringing medical devices closer to the patient is one of the main tasks of digital medicine [10].

This task is of particular relevance in connection with the **COVID-19** pandemic, since, on the one hand, it is important to timely diagnose and begin treatment of a patient with a threat of viral pneumonia (to minimize the likelihood of "missing the target"), and, on the other hand, to prevent unreasonable visits to

medical institutions and contacts with possible carriers of coronavirus infection (to minimize the likelihood of "false alarm").

**The purpose of the paper** is to develop a method that allows a patient to signal at home about the advisability of contacting a medical institution for an in-depth examination of the respiratory system and to evaluate the possibility of implementing this method on a smartphone using a built-in microphone.

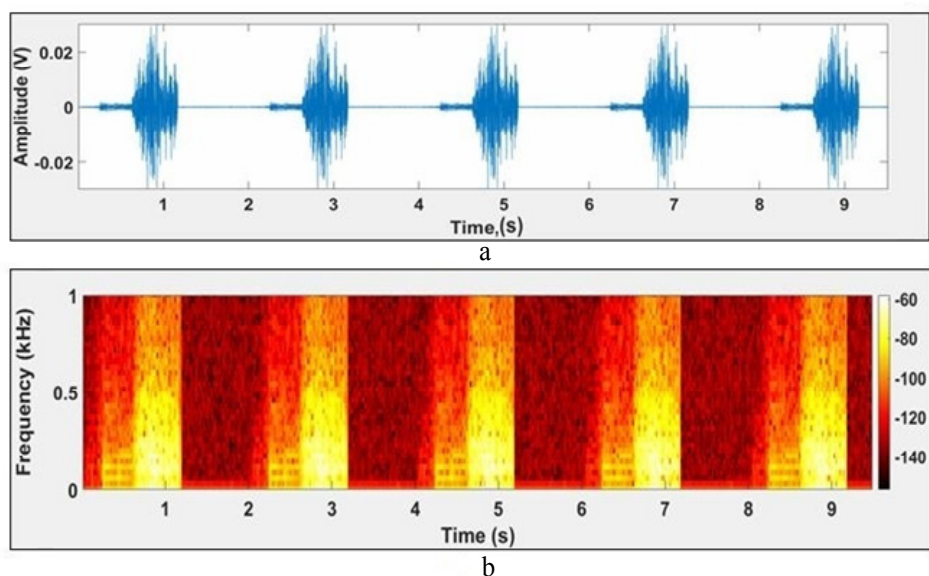
## BRIEF DESCRIPTION OF RESPIRATORY NOISES

Before proceeding directly to the solution of the problem, let us give a brief description of the main sounds of breathing known from the literature [11–15]. For this purpose, we will construct phonospirograms reflecting changes in the spectral characteristics of respiratory noise during respiration, using sound files stored on the Internet [16] (Fig. 1–3).

During auscultation of the lungs of a healthy person, the so-called vesicular breathing is heard in the frequency range of 18 – 360 Hz. In this case, the highest sound volume is concentrated in the range of 50 – 70 Hz, and the sound energy on inhalation significantly exceeds the sound energy on exhalation and is audible only in the initial period of the oscillation decay phase (Fig. 1).

In some organic diseases, for example, in patients with emphysema of the lungs, breathing, although it remains vesicular, is significantly weakened. On the other hand, with bronchitis and bronchial asthma, the so-called rigid vesicular breathing is observed. In this case, the sound energy is heard up to 600 Hz not only during inhalation, but throughout the entire exhalation.

The second type of main respiratory noise is *bronchial breathing*, which is several times higher than vesicular and reaches 700 – 1400 Hz, and sometimes more (up to 5000 Hz), and on exhalation the energy of bronchial respiration is often higher than on inhalation (Fig. 2).



**Fig. 1.** Sound signal of vesicular respiration (a) and the corresponding phonospirogram (b)

In a healthy person, the sound of bronchial breathing can be heard only with auscultation of the trachea and quite rarely in the 2–3 intercostal space. The appearance of the sound of bronchial breathing at any other point of auscultation of the lungs indicates pathology.

A type of bronchial breathing is called *amphoric breathing*, which is formed when a cavity is formed in the lungs, which is communicated by the bronchi. Such breathing is more pronounced on exhalation and is characterized by relatively high frequencies (from 500 to 5000 Hz) with a pronounced echo.

Additional respiratory noises, which are heard both on inhalation and exhalation against the background of the main respiratory sound, carry important diagnostic information. One of the types of additional respiratory noises is the so-called wheezing (dry and wet, Fig. 3), the appearance of which indicates a pathological process in the lungs, bronchi or in the pleura.

According to [17], dry rales are visualized on phonospirograms in the form of an ensemble of harmonics, and wet ones are short-term broadband impulse signals.

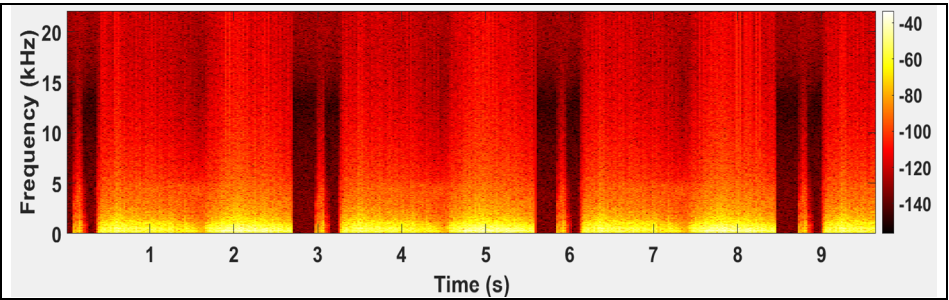
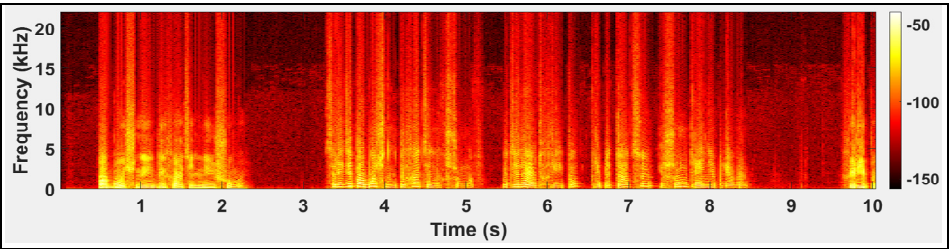
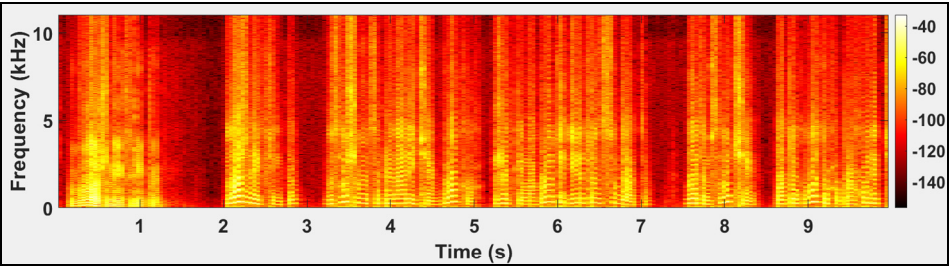


Fig. 2. Phonospirogram of bronchial respiration



a



b

Fig. 3. Phonospirograms of dry (a) and wet (b) wheezing

Another type of additional respiratory noise is **crepitus**, which occurs at the height of inspiration and sounds like a small crackle. Unlike wheezing, crepitus is audible only on inspiration, and its volume does not change after coughing up.

## CONCEPTUAL IDEA OF THE PROPOSED INFORMATION TECHNOLOGY

From the above brief and far from complete description, we can conclude that the differential diagnosis of respiratory diseases based on the sounds of breathing is far from a simple problem, the solution of which involves a subtle analysis of the time-frequency characteristics of phonospirograms observed at certain points in the patient's chest.

We set a simpler goal: for a specific patient, only to signal about possible respiratory disorders by sound signals observed using the built-in microphone of a smartphone without classifying the type of such a violation.

The conceptual idea underlying the proposed information technology (IT) develops the previously proposed approach to the assessment of cardiac activity, based on the principles of personalized diagnostics [18].

Let it be possible to conduct IT “training” for a particular patient over a sufficiently long period of time with the normal functional state of the respiratory system. To do this, using the built-in microphone of the smartphone, we register a certain amount of  $N_0$  respiratory noises at a certain point of the chest, construct phonospirograms  $\Psi_1, \dots, \Psi_{N_0}$  of these measurements.

Each individual phonospirogram is a function

$$\Psi = \Psi(f, t), \quad (1)$$

where  $\Psi$  — energy (level) of sound signal with frequency  $f \in F$  at the moment  $t \in T$ . Here  $F = [f_1, f_2]$  is a range of recorded frequencies in a given observation interval  $T = [t_1, t_2]$ .

The proximity of two phonospirograms  $\Psi_\mu$  and  $\Psi_\nu$  will be estimated by the magnitude

$$\tilde{L}_{ij} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |\Psi_\mu^{(k)}(f, t) - \Psi_\nu^{(k)}(f, t)|, \quad (2)$$

representing the average difference in sound energy  $\forall k \in F \times T$ .

For a correct assessment of the proximity of phonospirograms, let us normalize and synchronize them in time. Several methods of such synchronization have been investigated, one of which is reduced to the transition from distance (2) to a modified distance

$$L_{ij} = \min_{\rho=0, \dots, \Theta} \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |\Psi_\mu^{(k)}(f, t) - \Psi_\nu^{(k)}(f, t - \rho)|, \quad (3)$$

where  $\Theta$  — maximum permissible time shift of characteristic points of phonospirograms.

Distances (3) form an area in metric space that defines the *personal norm* of the respiratory system of a particular patient. The location of the current observation in relation to this area allows making decisions about the state of the user's respiratory system (Fig. 4).

Let's construct a matrix of paired distances  $L_{\mu\nu}$  between  $\mu$ -th ( $\mu = 1, \dots, N_0$ ) and  $\nu$ -th ( $\nu = 1, \dots, N_0$ ) phonospirograms  $\Psi_\mu$  and  $\Psi_\nu$  training sample.

$$\Lambda = \begin{pmatrix} L_{11}, & L_{12}, & \dots, & L_{1N_0} \\ L_{21}, & L_{22}, & \dots, & L_{2N_0} \\ \dots & & & \\ L_{N_01}, & L_{N_02}, & \dots, & L_{N_0N_0} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Matrix row  $\Lambda$ , the sum of the elements of which is minimal will determine the reference (most characteristic) phonospirogram of the given patient

$$S_0 = \arg \min_{1 \leq \nu \leq N_0} \sum_{\mu=1}^{N_0} L_{\mu\nu} \quad (5)$$

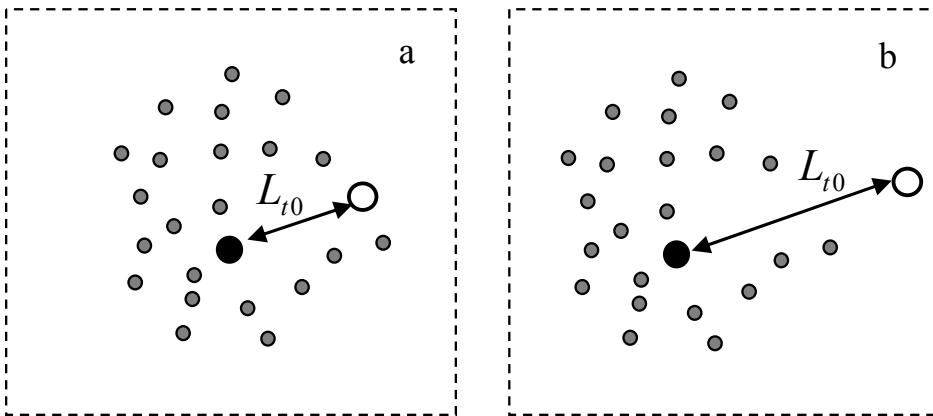
since it is at the minimum average distance from all other phonospirograms of the training sample.

As a result, by distance  $L_{n0}$  between the observed phonospirogram  $S_n$  and reference  $S_0$  you can make a decision according to the scheme:

$$\text{personal norm if } L_{n0} \leq L^0; \quad (6)$$

$$\text{suspected respiratory violation if } L_{n0} > L^0; \quad (7)$$

where  $L^0$  — some threshold value.



**Fig. 4.** Areas of the personal norm of phonospirograms: trainings (gray dots); reference (black point) and current (white point)

## SIMULATION RESULTS

Let us present the results of an experimental study of the computational procedures necessary for the implementation of the proposed approach, which were carried out using the MATLAB R2019b system.

Breathing sounds were recorded using a microphone built into the smartphone, which was applied to the volunteer's chest (Fig. 5). The recording of the sound signal  $y(t)$  with a sampling rate of  $F_D = 48 \text{ KHz}$  was carried out in a closed room in the absence of extraneous noise.

To determine the spectral components of the  $y(t)$  signal, the *Frigo-Johnson* [19] procedure was used, which is still recognized as one of the best procedures implementing the fast Fourier transform (FFT) algorithm.

Since the signal  $y(t)$  of respiratory noise is non-stationary and has a complex time-frequency organization, the *Short-Time Fourier Transformation* [20] algorithm was used to construct phonospirograms. In accordance with this algorithm, the observation interval  $T = [t_1, t_2]$  of the signal  $y(t)$  was divided into local time sections (frames), within which the signal is assumed to be stationary. For each such area, spectral components are determined based on the FFT procedure. As a result, a phonospirogram is formed

$$\Psi(f, t) = \int_{\tau} y(t) w(t - \tau) e^{-2\pi i f t} d\tau \quad (8)$$

depending on both the frequency  $f$  and the time  $t$ , where  $w(t - \tau)$  is the window function.

In the experiments, the total observation interval  $T = [t_1, t_2]$  was 23 s, which was divided into  $N \approx 200$  frames of the same duration.



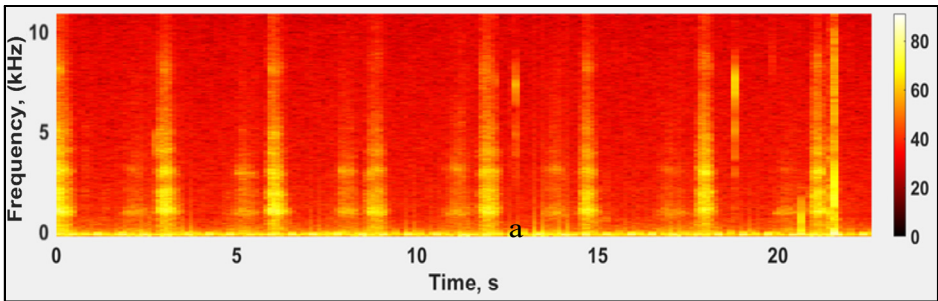
**Fig. 5.** Registration of respiratory sound using a smartphone

To simplify calculations, using an additional procedure, the sets of values  $\Psi$ ,  $F$ ,  $T$  were divided into elementary cells  $\delta_\Psi\Psi$ ,  $\delta_FF$ ,  $\delta_TT$  of optimal sizes. This made it possible, without a significant loss of accuracy, to estimate the distances between phonospirograms not by all points of  $k \in F \times T$ , but within the selected cells (Fig. 6) and thereby more than 15 times reduce the computation time.

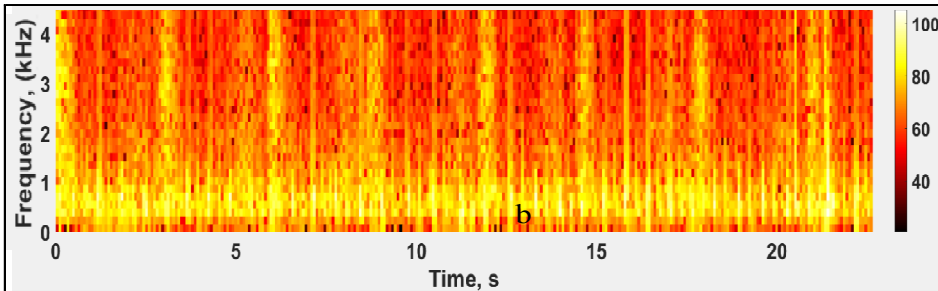
Experiments have shown that the integral characteristics of the phonospirogram images of a particular test subject change little over time. Therefore, the construction of a reference phonospirogram  $S_0$  can be carried out using a small number of phonospirograms. Of course, the training phase should be carried out only in the absence of clinical signs of respiratory disorders.

Fig. 7 shows a series of phonospirograms of a healthy volunteer at the age of 21 years, which were registered within five days. These phonospirograms were used to construct a matrix  $\Lambda$  of paired distances  $L_{\mu\nu}$ :

$$\Lambda = \begin{pmatrix} 0 & 1,0916 & 1,3958 & 1,1927 & 1,2536 \\ 1,0916 & 0 & 1,3421 & 1,1800 & 1,2530 \\ 1,3958 & 1,3421 & 0 & 1,4864 & 1,3968 \\ 1,1927 & 1,1800 & 1,4864 & 0 & 1,3267 \\ 1,2536 & 1,2530 & 1,3968 & 1,3267 & 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

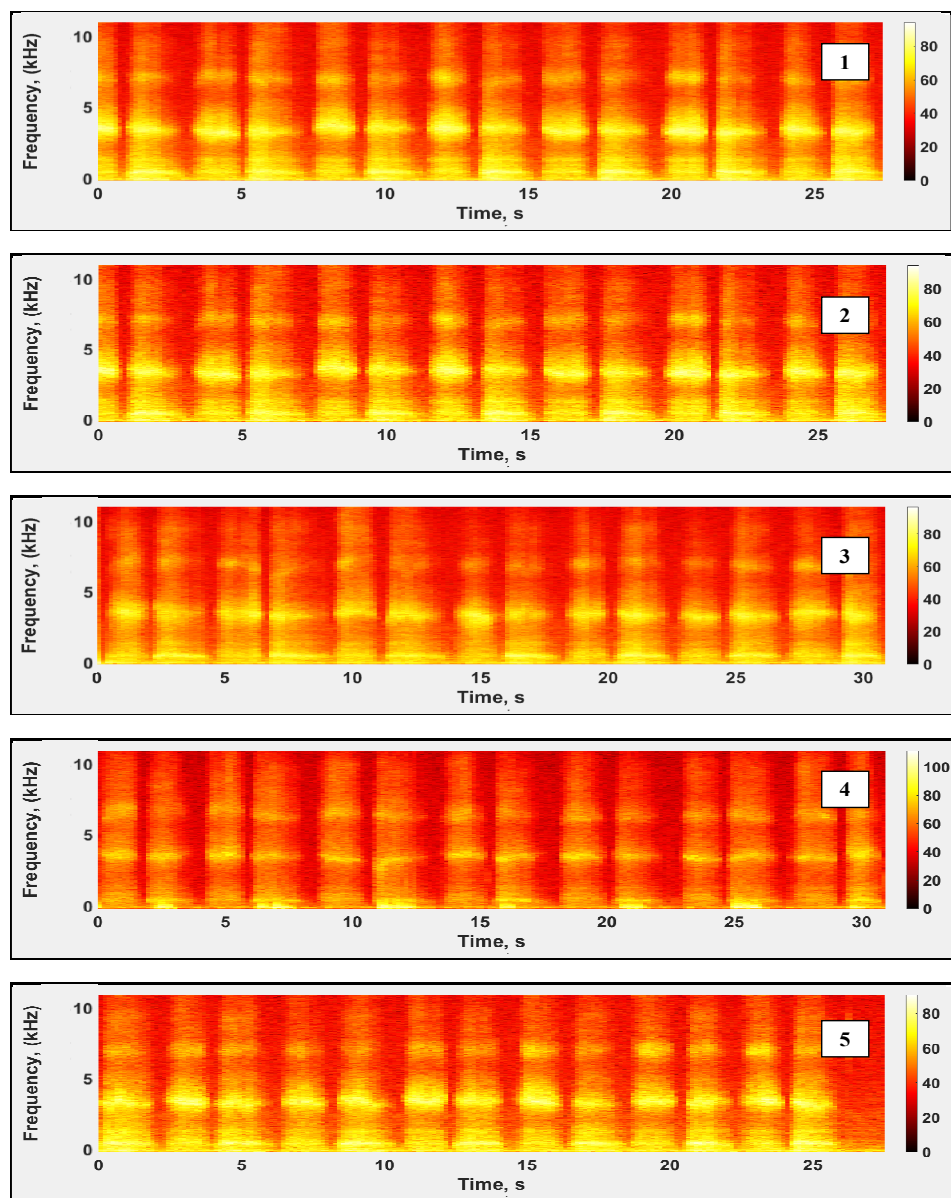


a



b

**Fig. 6.** Images of the original (a) and coarse (b) phonospirograms



**Fig 7.** Training selection of phonospirograms of a healthy volunteer

Applying condition (4) to the elements of matrix (8), it was determined that phonospirogram № 1 can be considered a reference according to the results of training for a given patient. The same phonospirogram was recognized as a reference and when processing coarse phonospirograms.

The reference phonospirogram  $S_0$ , built at the training stage for a specific user, will be used in the decision rule (6), (7). To assess the efficiency of the rule, a phonospirogram of the same volunteer in case of respiratory impairment is required. In view of the lack of such data, we have developed a simplified model for constructing an artificial phonospirogram that simulates a patient's respiratory disorder.

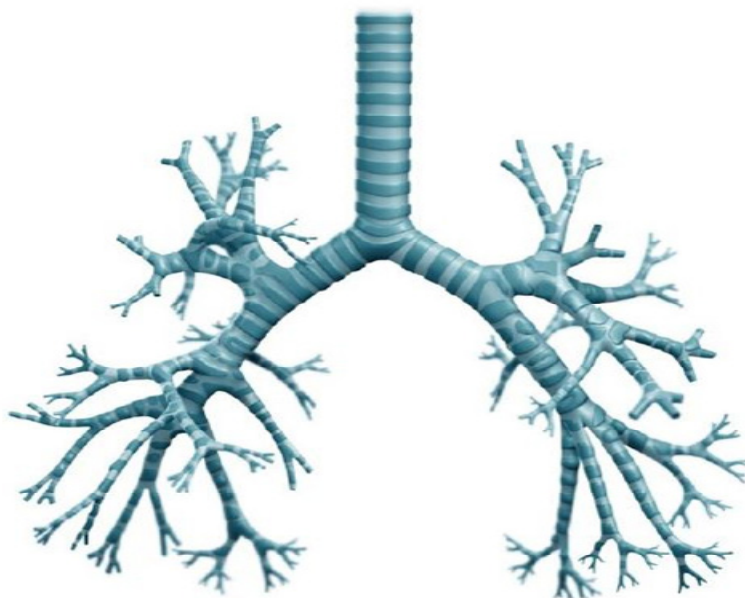
In the scientific literature, there are various approaches to the construction of mathematical models of respiratory sounds in norm and disease [21–25]. These studies form the informational basis of rather complex computer systems that provide decision support in the differential diagnosis of pulmonary diseases [26–30].

However, to solve the problem that we have set ourselves, there is no need to conduct a fine analysis of respiratory noise. It is enough only to detect the characteristic changes in the phonospirogram of a particular patient, which can be used as a predictor of the occurrence of a respiratory disorder.

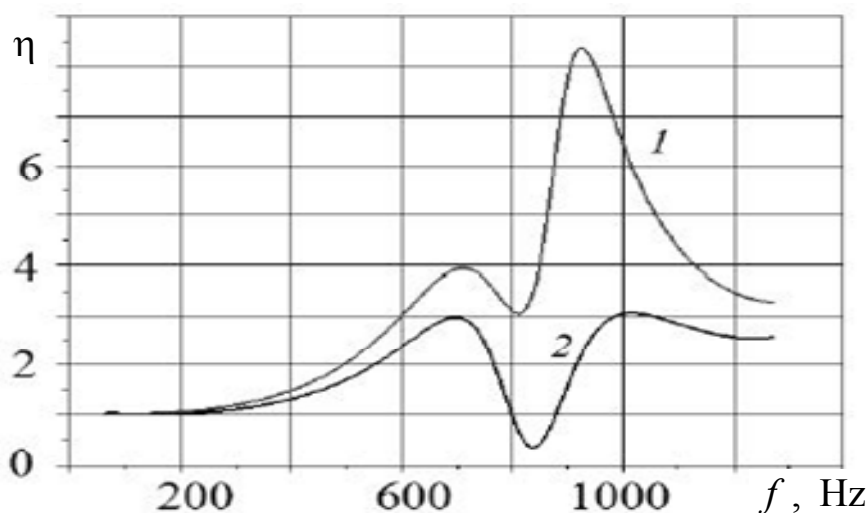
In accordance with generally accepted concepts [31], the human respiratory system is a tracheobronchial tree - a branching of the Weibel pathways (Fig. 8). Noises in different parts of such a system are associated with nonlinear effects caused by the transitions of laminar to turbulent flow both in the air flow itself and in the interaction of the flow with the changing boundaries of the channel [32].

Based on the analysis of information from the available literature, the following requirements for a simplified model of the formation of pathological respiratory sound can be formulated:

- in the event of respiratory disorders, characteristic additional respiratory sounds occur, which are mainly heard in the expiration phase of breathing;
- additional breathing sounds are located in the frequency band  $\Omega = 800 - 1200$  Hz (Fig. 9);
- the energy of individual spectral components of the additional noise can exceed the energy of the spectral components of the sound signal characteristic of vesicular respiration (Fig. 9).



**Fig. 8.** Diagram of the branching of the Weibel pathways of the respiratory system [31]



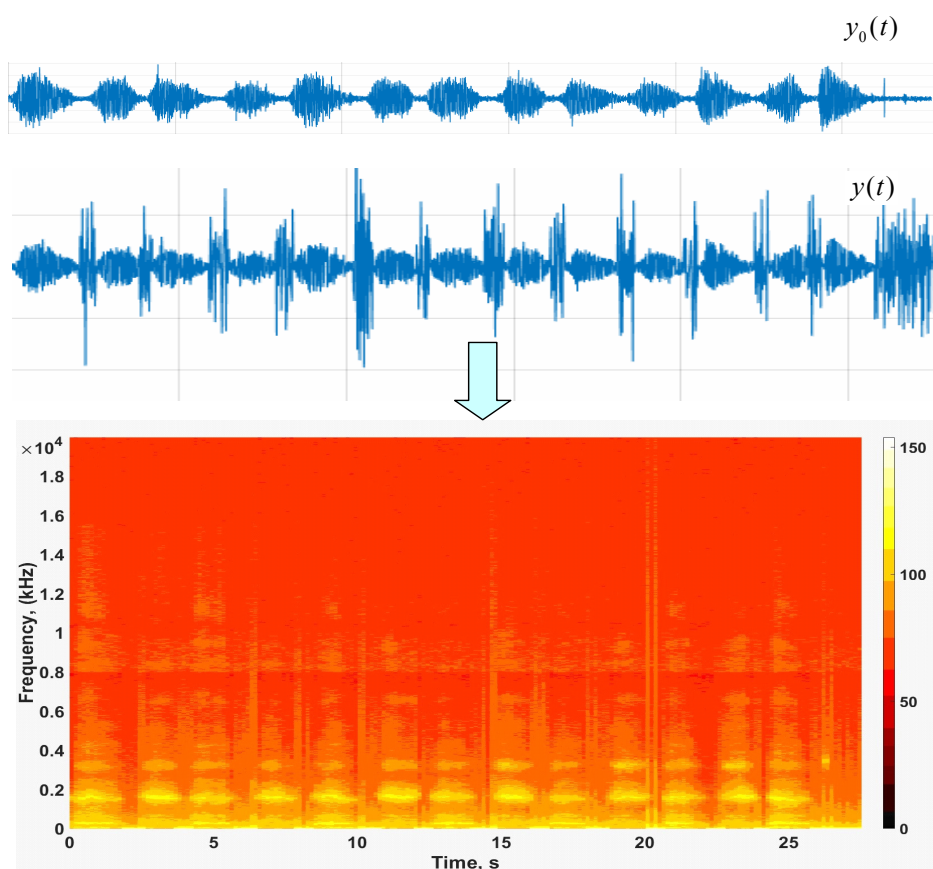
**Fig. 9.** Differences in the relative frequency characteristics of  $\eta$  on audio signals sick (1) and healthy 2 patients (according to [31])

Taking these requirements into account, let us present a model of pathological respiratory noise in the form of an additive mixture of a real sound signal  $y_0$  of a particular patient during vesicular breathing and a certain sum of  $S$  harmonic components with fixed frequencies  $\omega_s \in \Omega$ , given amplitudes  $a_s$  and phases  $\varphi_s$ :

$$y(t) = y_0(t) + \begin{cases} 0, & \text{if } t \in T_0, \\ \sum_{s=1}^S a_s \cos(\omega_s t + \varphi_s), & \text{if } t \notin T_0, \end{cases} \quad (10)$$

where  $\Omega = 800 - 1200$  Hz is the frequency range of noise components on exhalation, which are characteristic of additional noises in respiratory disorders, and  $T_0 = [t_1^{(1)}, t_2^{(1)}] \cap [t_1^{(2)}, t_2^{(2)}] \cap \dots \cap [t_1^{(N)}, t_2^{(N)}]$  is the combination of time intervals that correspond  $N$  to successive inhalation cycles on the signal  $y_0$ .

As a result, a signal  $\Omega = 800 - 1200$  Hz is formed, imitating the violation of vesicular respiration, which can be used to construct an artificial phonospirogram of a respiratory disorder in a particular patient (Fig. 10).



**Fig. 10.** Construction of an artificial phonospirogram

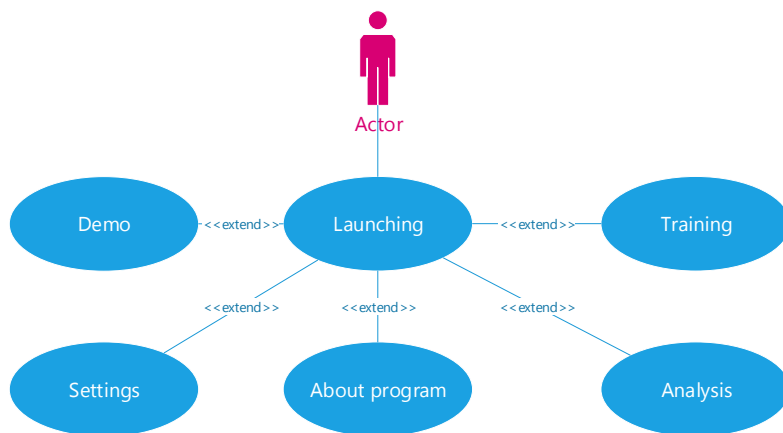
Model experiments showed that the average distance between the photoplethysmogram, simulating a respiratory disorder, and the photoplethysmogram of a healthy volunteer (interclass distance) was more than five times greater than the intraclass distance between photoplethysmograms during normal respiratory respiration. The established fact made it possible to switch to software implementation of the proposed IT on a smartphone.

### SOFTWARE IMPLEMENTATION OF IT ON A SMARTPHONE

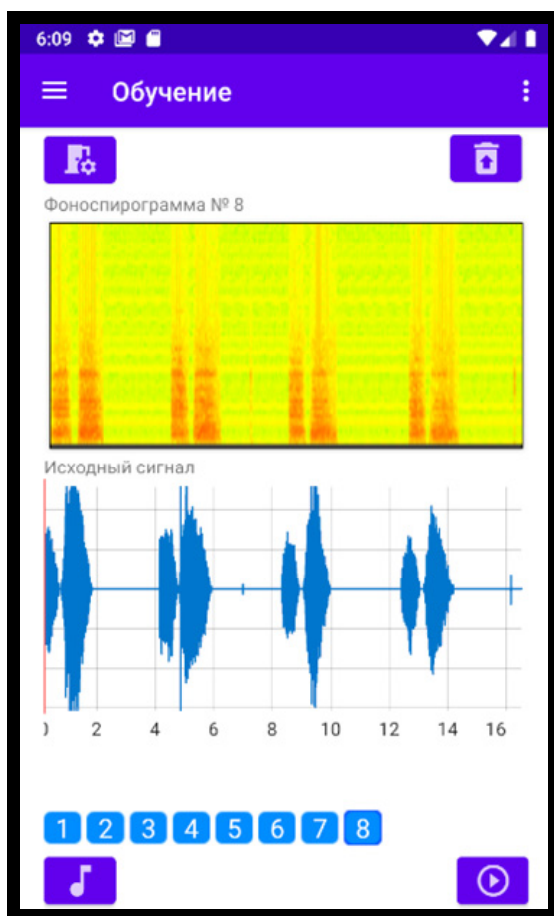
The software application is developed in the Java programming language using the Android Studio 4.1.2 integrated development environment. The program is designed to work under the operating system Android 4.1 and higher. The visualization of graphical information was carried out using the Com.jjoe64 library: graphview: 4.2.2.

The program implements four main modes (Fig. 11):

- "Training";
- "Analysis";
- "Demo";
- "Setting".



**Fig. 11.** Simplified Use Case diagram in UML notation



**Fig. 12.** Working window of the program in the "Training" mode

The "Training" mode provides:

- recording into the smartphone's memory a series of sound signals recorded by the built-in microphone when the smartphone is placed on the user's chest (Fig. 5);
- listening to registered sound files;
- construction of phonospirograms of registered signals based on the *Short-Time Fourier Transformation* algorithm;
- determination of the reference photospirogram based on the analysis of the matrix (4) of paired distances between the phonospirograms of the training sample.

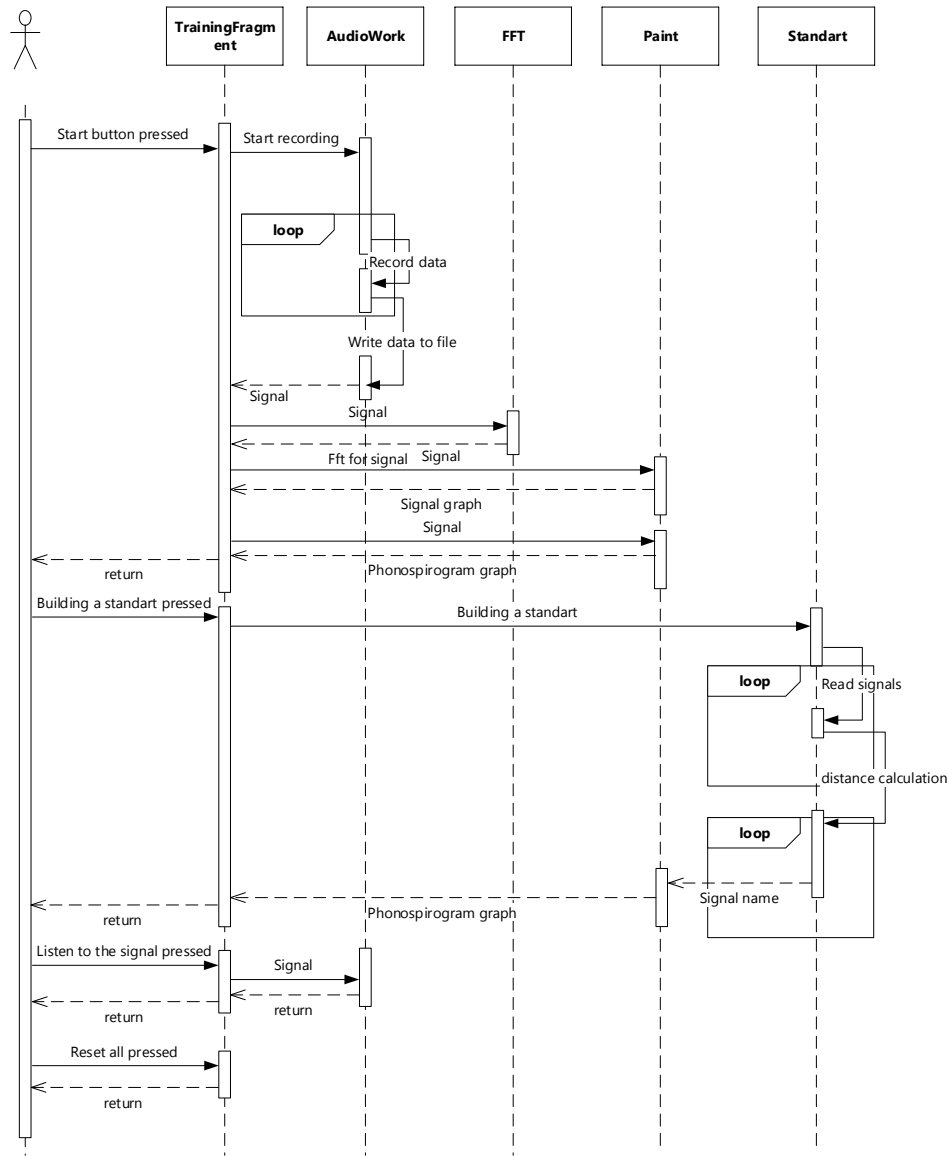


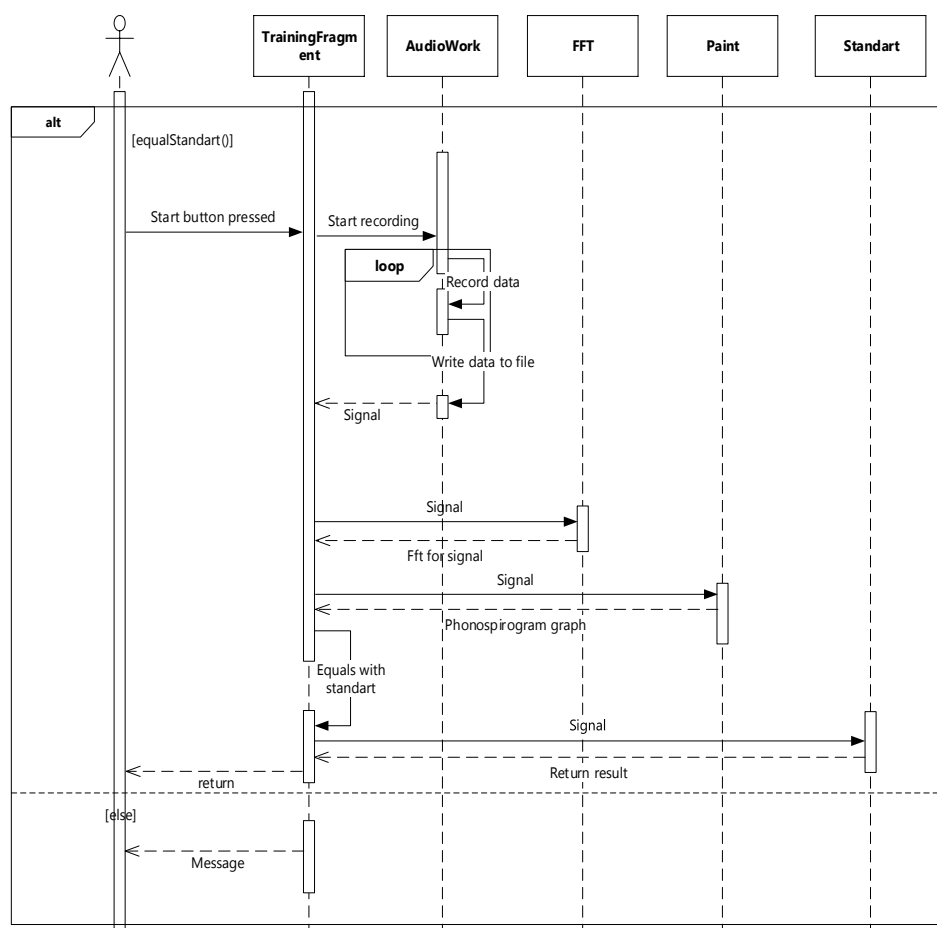
Fig. 13. The Sequence diagram of "Training" mode

The program implements a friendly interface (Fig. 12), which creates convenience for the user in the process of registering sound files. In particular, the rate of breathing is controlled by the software metronome, which signals the user to take another deep breath and exhale. The preset breathing rate is adjusted in the "Settings" mode.

The sequence of operations in the "Training" mode is illustrated by the sequence diagram (Fig. 13).

In the "Analysis" mode, a comparison of the current phonospirogram recorded during the observation period with a personalized standard built in the "Training" mode is provided. The registered signal is displayed on the screen and can be listened to using a smartphone. The screen also displays the current and reference phonospirogram.

On the basis of automatic comparison of the current and reference phonospirograms, the analysis result is formed in accordance with the proposed rule (6), (7). The analysis result is also duplicated by an audio message.



**Fig. 14.** The Sequence diagram of "Analysis" mode

The sequence of operations is illustrated by the diagram shown in Fig. 14. For a simplified demonstration of the functions of the program, the "Demo" mode is implemented, which uses previously prepared files of the reference phonospirogram and phonospirograms built from normal and pathological sound files using a simulator (10).

Further studies are planned to focus on the refinement of threshold values, the construction of decision rules and the assessment of the reliability of decisions made on respiratory noise recorded in groups of healthy patients and verified patients.

## CONCLUSION

The article proposes an approach to the construction of information technology that will signal the user at home about possible respiratory disorders and the need to visit a doctor for a more complete examination. A distinctive feature of the technology is the formation of a personalized norm for a specific user (reference phonospirogram) based on a self-learning procedure by results of multiple measurements of the user's breathing, recorded using the built-in microphone of a smartphone.

It is shown that the implementation of procedures for constructing personalized phonospirograms of the user's respiratory noise based on the Short-Time Fourier Transformation method and digital processing of phonospirograms can be implemented on an average performance smartphone running the Android operating system.

It is advisable to continue research on representative samples of observations.

## REFERENCES

1. Piirila P., Sovijarvi A.R. Crackles: recording, analysis and clinical significance. *European Respiratory Journal*. 1995, no. 8(12), pp. 2139–2148. DOI: 10.1183/09031936.95.08122139.
2. Forgacs P. The functional basis of pulmonary sounds. *Chest Journal*. 1978, vol. 73, no 3, pp. 399–405. DOI: 10.1378/chest.73.3.399.
3. Kosovets LI Experience of electronic registration and classification of breathing sounds of children with bronchopulmonary diseases. *Collection of works of acoustic symposium "Consonance-2011"*. 2011: Institute of Hydromechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, pp. 154–159. (In Russian).
4. Pasterkamp H., Carson C., Daien D., Oh Y. Digital respirosography. New images of lung sounds. *Chest Journal*. 1989, vol. 96, no 6, pp. 1405–1412. DOI: 10.1378/chest.96.6.1405.
5. Pasterkamp H., Patel S., Wodicka G.R. Asymmetry of respiratory sounds and thoracic transmission. *Medical and Biological Engineering and Computing*. 1997, vol. 35, pp. 103–106. <https://doi.org/10.1007/BF02534138>.
6. Wodichka G.R., Kraman S.S., Zenk G.M., Pasterkamp H. Measurement of respiratory acoustic signals. *Chest Journal*. 1994. vol. 106, no. 4, pp. 1140–1144.
7. Murphy R.L.H., Vyshedskiy A. et al. Automated Lung Sound Analysis in Patients With Pneumonia. *Respiratory Care*. 2005, vol. 49, no. 12, pp. 1490–1497. DOI: 10.1378/chest.124.4\_MeetingAbstracts.190S-b
8. Vovk I.V., Goncharova I.Yu. An analytical method for assessing the acoustic properties of stethoscopes. *Acoustic bulletin*. 2000, vol. 3, no. 2, pp. 10–16. (In Russian).
9. Goncharova Yu.O. Prospects for storing phonospirographic computer diagnostics in children with bronchogenic dysplasia. *Bulletin of VDNZU "Ukrainian Medical Stomatological Academy"*. 2013, vol. 13, issue 2 (42), pp. 85–88. (In Russian).
10. Gritsenko V.I., Fainzilberg L.S. Intelligent information technologies in digital medicine on the example of phase-graphy. Kyiv: Naukova Dumka, 2019. 423 p. (In Russian).

11. Cugell D.W. Lung sound nomenclature. *The American Review of Respiratory Disease*. 1987, vol. 136, no. 4, pp. 1016. DOI: 10.1164/ajrccm/136.4.1016.
12. Earis J. Lung sounds. *Thorax*. 1992, no. 47, pp. 671–672.
13. Loudon R.G., Murphy R.L. 1984. Lung sounds. *The American Review of Respiratory*. 1984, Vol. 130, pp. 663–673.
14. Paciej R., Vyshedskiy A., Bana D. Squawks in pneumonia. *Thorax*. 2004, vol. 59, pp. 177–178.
15. Wilkins R.L., Dexter J.R., Murphy R.L., Belbono E.A. Lung sound nomenclature survey. *Chest Journal*. 1990, no. 98, pp. 886–889. DOI: 10.1378/chest.98.4.88.
16. Sounds in human lungs download and listen online. URL: <https://zvukipro.com/zvukiludei/1392-zvuki-v-legkih-cheloveka.html>. (Last accessed: 20.03.2021) (In Russian).
17. Makarenkova A.A., Ermakova O.V. Preliminary studies of breathing sounds in patients with chronic obstructive pulmonary disease. *Abstracts of the reports of the acoustic symposium "Consonance-2009"*. 2009, Institute of Hydromechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, pp. 40–41. (In Russian).
18. Fainzilberg L.S. About one approach to the personification of diagnostic decisions on the example of the assessment of cardiac activity. *Cybernetics and Computer Science*. 2014, no. 178, p. 52–65. (In Russian).
19. Frigo M., Johnson S.G. FFTW: An adaptive software architecture for the FFT. *Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Seattle, 1998: WA, vol. 3, pp. 1381–1384.
20. Sejdić E., Djurović I., Jiang J. Time-frequency feature representation using energy concentration: An overview of recent advances. *Digital Signal Processin*. 2009, vol. 19, no 1, pp. 153–183. DOI:10.1016/j.dsp.2007.12.004.
21. Bureev A.S. Mathematic model for spectral characteristics of respiratory sounds registered in trachea region. *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2016, vol. 12, no 5. pp. 4569–4578.
22. Ghafarian P., Jamaati H., Hashemian S.M. A Review on human respiratory modeling. *Tanaffos*. 2016, vol.15, no. 2, pp. 61–69.
23. Harper P., Kraman S.S., Pasterkamp H., Wodicka R. An acoustic model of the respiratory tract. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2001, vol. 48, no. 5, pp. 543–550. DOI: 10.1109/10.918593.
24. Harper P. Modeling and measurement of flow effects on tracheal sounds. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2003, vol. 50, no 1, pp. 1–10.
25. Liu Y., So R.M.C., Zhang C.H. Modeling the bifurcating flow in an asymmetric human lung airway. *Journal of Biomechanics*. 2003, vol. 36, no. 7, pp. 951–959.
26. Venegas J.G. Self-organized patchiness in asthma as a prelude to catastrophic shifts. *Nature*. 2005, vol. 434, pp. 777–782.
27. Xi J. Numerical study of dynamic glottis and tidal breathing on respiratory sounds in a human upper airway model. *Sleep and Breathing*. 2017, vol. 22, pp. 463–479. DOI: 10.1007/s11325-017-1588-0.
28. Gurung A. Computerized lung sound analysis as diagnostic aid for the detection of abnormal lung sounds: A systematic review and meta-analysis. *Respiratory Medicine*. 2011, vol. 105, no. 9, pp. 1396–1403. DOI: 10.1016/j.rmed.2011.05.007.
29. Schmidt A., Zidowitz S., Kriete A., Denhard T., Krass S., Peitgen H.O. A digital reference model of the human bronchial tree. *Computerized Medical Imaging and Graphics*. 2004, vol. 28, no. 4, pp. 203–211. DOI: 10.1016/j.compmedimag.2004.01.001.
30. Korenbaum V.I. Acoustic diagnostics of the human respiratory system based on an objective analysis of respiratory sounds. *Vestnik FEB RAS*. 2004, no. 5, pp. 68–79. (In Russian).
31. Furman E.G., Sokolovsky V.L., Furman G.B. Mathematical model of respiratory noise propagation in the respiratory tract. *Russian journal of biomechanics*. 2018, vol. 22, no. 2b, pp. 166–177. (In Russian). DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2018.2.03.
32. Dyachenko A.I., Mikhailovskaya A.N. Respiratory acoustics (Review). *Proceedings of the Prokhorov General Physics Institute*. 2012, vol. 68, pp. 136–181. (In Russian).

Received 02.03.2020

ЛІТЕРАТУРА

1. Piirila P., Sovijarvi A.R. Crackles: recording, analysis and clinical significance. *European Respiratory Journal*. 1995. no. 8(12). P. 2139–2148. DOI:10.1183/09031936.95.08122139.
2. Forgacs P. The functional basis of pulmonary sounds. *Chest Journal*. 1978. vol. 73. no 3. P. 399–405. DOI: 10.1378/chest.73.3.399.
3. Косовец Л. И. Опыт электронной регистрации и классификации шумов дыхания детей с бронхолегочными заболеваниями. *Збірник праць акустичного симпозиуму “Консонанс-2011”*. 2011: Інститут гідромеханіки НАН України. С. 154–159.
4. Pasterkamp H., Carson C., Daien D., Oh Y. Digital respirosography. New images of lung sounds. *Chest Journal*. 1989. vol. 96. no 6. P. 1405–1412. DOI: 10.1378/chest.96.6.1405.
5. Pasterkamp H., Patel S., Wodicka G.R. Asymmetry of respiratory sounds and thoracic transmission. *Medical and Biological Engineering and Computing*. 1997. vol. 35. P. 103–106. <https://doi.org/10.1007/BF02534138>.
6. Wodicka G.R., Kraman S.S., Zenk G.M., Pasterkamp H. Measurement of respiratory acoustic signals. *Chest Journal*. 1994. vol. 106. no. 4. P. 1140–1144.
7. Murphy R.L.H., Vyshedskiy A. et al. Automated Lung Sound Analysis in Patients With Pneumonia. *Respiratory Care*. 2005. vol. 49. no. 12. P. 1490–1497. DOI: 10.1378/chest.124.4\_MeetingAbstracts.190S-b
8. Вовк І.В., Гончарова І.Ю. Аналітичний метод оцінки акустичних властивостей стетоскопів. *Акустичний вісник*. 2000. том 3. № 2. С. 10–16.
9. Гончарова І.Ю. Перспективи застосування фоноспірографічної комп’ютерної діагностики у дітей із бронхолегеневою дисплазією. *Вісник ВДНЗУ «Українська медична стоматологічна академія»*. 2013. том 13. вып. 2(42). С. 85–88.
10. Гриценко В.І., Файнзильберг Л.С. Интеллектуальные информационные технологии в цифровой медицине на примере фазографии. Киев: Наукова Думка, 2019. 423 с.
11. Cugell D.W. Lung sound nomenclature. *The American Review of Respiratory Disease*. 1987. vol. 136. no. 4. P. 1016. DOI: 10.1164/ajrccm/136.4.1016.
12. Earis J. Lung sounds. *Thorax*. 1992. No. 47. P. 671–672.
13. Loudon R.G., Murphy R.L. 1984. Lung sounds. *The American Review of Respiratory*. 1984. Vol. 130. P. 663–673.
14. Paciej R., Vyshedskiy A., Bana D. et al. Squawks in pneumonia. *Thorax*. 2004. vol. 59. P. 177–178.
15. Wilkins R.L., Dexter J.R., Murphy R.L., Belbono E.A. Lung sound nomenclature survey. *Chest Journal*. 1990. no. 98. P. 886–889. DOI: 10.1378/chest.98.4.88.
16. Звуки в легких человека скачать и слушать онлайн. <https://zvukipro.com/zvukiludei/1392-zvuki-v-legkih-cheloveka.html>
17. Макаренко А.А., Ермакова О.В. Предварительные исследования звуков дыхания у больных хроническими obstructивными заболеваниями легких. *Тези доповідей акустичного симпозиуму “Консонанс-2009”*. 2009: Інститут гідромеханіки НАН України С. 40–41
18. Файнзильберг Л.С. Об одном подходе к персонификации диагностических решений на примере оценки сердечной деятельности. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2014. вып. 178. С. 52–65.
19. Frigo M., Johnson S.G. FFTW: An adaptive software architecture for the FFT. *Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Seattle, 1998: WA. vol. 3. P. 1381–1384.
20. Sejdić E. Djurović I. Jiang J. Time-frequency feature representation using energy concentration: An overview of recent advances. *Digital Signal Processin*. 2009. vol. 19. no 1. P. 153–183. DOI:10.1016/j.dsp.2007.12.004.
21. Bureev A.S. Mathematic model for spectral characteristics of respiratory sounds registered in trachea region. *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2016. vol. 12. no 5. P. 4569–4578.
22. Ghafarian P., Jamaati H., Hashemian S.M. A Review on human respiratory modeling. *Tanaffos*. 2016. vol.15. no. 2. P. 61–69.

23. Harper P., Kraman S.S., Pasterkamp H., Wodicka R. An acoustic model of the respiratory tract. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2001. vol. 48. no. 5. P. 543–550. DOI: 10.1109/10.918593.
24. Harper P. Modeling and measurement of flow effects on tracheal sounds. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2003. vol. 50. no 1. P. 1–10.
25. Liu Y., So R.M.C., Zhang C.H. Modeling the bifurcating flow in an asymmetric human lung airway. *Journal of Biomechanics*. 2003. vol. 36. no. 7. P. 951–959.
26. Venegas J.G. Self-organized patchiness in asthma as a prelude to catastrophic shifts. *Nature*. 2005. vol. 434. P. 777–782.
27. Xi J. Numerical study of dynamic glottis and tidal breathing on respiratory sounds in a human upper airway model. *Sleep and Breathing*. 2017. vol. 22. P. 463–479. DOI: 10.1007/s11325-017-1588-0.
28. Gurung A. Computerized lung sound analysis as diagnostic aid for the detection of abnormal lung sounds: A systematic review and meta-analysis. *Respiratory Medicine*. 2011. vol. 105. no. 9. P. 1396–1403. DOI: 10.1016/j.rmed.2011.05.007.
29. Schmidt A., Zidowitz S., Kriete A., Denhard T., Krass S., Peitgen H.O. A digital reference model of the human bronchial tree. *Computerized Medical Imaging and Graphics*. 2004. vol. 28. no. 4. P. 203–211. DOI: 10.1016/j.compmedimag.2004.01.001.
30. Коренбаум В.И. Акустическая диагностика системы дыхания человека на основе объективного анализа дыхательных звуков. *Вестник ДВО РАН*. 2004. № 5. С. 68–79.
31. Фурман Е.Г., Соколовский В.Л., Фурман Г.Б. и др. Математическая модель распространения дыхательных шумов в респираторном тракте. *Российский журнал биомеханики*. 2018. том 22. № 26. С. 166–177. DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2018.2.03.
32. Дьяченко А.И., Михайловская А.Н. Респираторная акустика (Обзор). *Труды Института общей физики им. А.М. Прохорова*. 2012. том 68. С. 136–181.

Отримано 02.03.2020

Файнзильберг Л.С.<sup>1</sup>, д-р техн. наук, професор,  
голов. наук. співроб. відд. інтелектуальних автоматичних систем  
e-mail: fainzilberg@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-3092-0794

Соловей С.Р.<sup>2</sup>,  
студент, фак-т біомедичної інженерії  
e-mail: maximum.lenovo.ml@gmail.com

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

<sup>2</sup> Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
пр. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна

## САМОНАВЧАЛЬНА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ РЕСПІРАТОРНИХ ПОРУШЕНЬ У ДОМАШНІХ УМОВАХ

**Вступ.** У зв'язку з пандемією COVID-19 є важливим своєчасно почати лікування у разі загрози розвитку у пацієнта вірусної пневмонії. Розв'язання цього завдання вимагає створення засобів для виявлення респіраторних порушень з мінімальною ймовірністю «пропуску цілі». Водночас не менш важливо звести до мінімуму відвідування медичних установ здоровими пацієнтами через небезпеку їхнього контакту з можливими носіями коронавірусної інфекції, тобто мінімізація ймовірності «помилкової тривоги».

**Мета статті** — розробити метод, який дає змогу в домашніх умовах сигналізувати пацієнту про доцільність звернення до медичного закладу для поглибленого обстеження системи органів дихання, та оцінити можливість реалізації цього методу на смартфоні з використанням вбудованого мікрофона.

**Методи.** Відрізнена особливість запропонованого підходу полягає у побудові персоналізованого еталона нормального респіраторного дихання конкретного пацієнта на основі самонавчання за кінцевою вибіркою спостережень у домашніх умовах і у порівнянні на основі оригінальних обчислювальних алгоритмів фоновідеограм звукового сигналу наступних спостережень з еталоном.

**Результати.** Розроблено прототип інформаційної технології, яка забезпечуватиме у домашніх умовах сигналізацію про можливі респіраторні порушення, що потребують консультацій з лікарем і необхідність поглибленого медичного обстеження.

Показано, що побудову персоналізованого еталона нормального респіраторного дихання може бути здійснено на основі використання сукупності оригінальних обчислювальних процедур за кінцевою вибіркою реалізацій, самостійно зареєстрованих користувачем за допомогою вбудованого в смартфон мікрофона. Алгоритм побудови еталона оснований на цифровому обробленні матриці парних відстаней між фоновідеограмами кінцевої навчальної вибірки спостережень.

**Висновки.** Програмний застосунок, що забезпечує реалізацію запропонованих обчислювальних процедур, може бути здійснено на смартфоні середньої продуктивності під керуванням операційної системи Android.

**Ключові слова:** респіраторні шуми, інтелектуальна ІТ, обчислювальні процедури, смартфон.

---

DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt204.02.084>

UDC 615.47: 004.9

**VOVK M.I.**, PhD (Biology), Senior Researcher,  
Head of the Bioelectrical Control  
& Medical Cybernetics Department  
ORCID: 0000-0003-4584-9553  
e-mail: vovk@irtc.org.ua; imvovk3940@gmail.com

**KUTSIK O.A.**, PhD (Engineering),  
Senior Researcher of the Bioelectrical Control  
& Medical Cybernetics Department  
ORCID: 0000-0003-2277-7411  
e-mail: spirotech85@ukr.net  
International Research and Training Center for Information Technologies  
and Systems of the NAS of Ukraine and of MES of Ukraine,  
40, Acad. Hlushkov av. Kyiv, 03187, Ukraine

---

## AI-TECHNOLOGY OF MOTOR FUNCTIONS DIAGNOSTICS AFTER A STROKE

---

**Introduction.** *Diagnostics of motor functions plays an important role in the motor functions restoration after stroke. Synthesis of effective technologies for personalized assessment of motor functions disorders at different rehabilitation stages is an urgent scientific and applied task.*

**The purpose of the paper** is to develop information technology for diagnostics of motor functions deficit after stroke, that uses artificial intelligence tools to increase the effectiveness of the diagnostic process.

**Results.** *The theoretical and practical foundations to synthesize AI-technology for personal diagnostics of motor functions deficit, and the assessment of their restoration as a result of rehabilitation measures after stroke have been developed. For informational assistance to the physician in the diagnostic process, artificial intelligence is used. A new class of mobile digital medicine tools – the specialized software modules for motor functions diagnostics "Movement-TestStroke 1.1 (PC)" installed in the PC-structure, and "MovementTestStroke 1.1 (MD)" installed in mobile platforms running under Android operation system have been developed. Software implementation — Visual Studio 2019, C# programming language. Structural and functional models of user – software modules interaction, algorithms for motor function deficit diagnostics, and UML-diagrams of these modules are presented.*

*Functional features of the technology: an expanded range of evidence criteria for personalized quantitative assessment of limb movements deficit, storage in the Database and display on the interface the results of deficit assessment, as well as the deficit dynamics during the rehabilitation course in a convenient form (tables, graphs) make it possible to reduce the physician's error, prevent complications, identify the disorders specifics, compare the rehabilitation effectiveness of the upper and lower limbs, their distal and proximal parts, including fine motor skills of the hand, restoration of which helps to restore speech in motor or motor and sensory aphasia.*

**Conclusions.** *The usage of artificial intelligence tools to diagnose motor deficit will increase the diagnostic effectiveness, and, as a consequence, rehabilitation services for patients after stroke.*

**Keywords:** *diagnostics, motor functions, stroke, personal quantitative assessment, criteria, technology, artificial intelligence, software module, structural-functional model, algorithm, activity diagram.*

© VOVK M.I., KUTSIK O.A., 2021

## **INTRODUCTION**

For many years, stroke is one of the main causes of disability and death both in the world and in Ukraine. Of particular concern is the increasing burden of stroke among people of working age: more than 50 % of stroke survivors never return to work. In Europe an action plan to combat stroke in 2018–2030 is approved [1]. One of the main consequences of stroke is motor activity disorders: paralysis, paresis, problems with coordination, muscle hypertone, loss of sensitivity in the arms and legs, etc. A significant place is also occupied by speech disorders, among which the most common is motor aphasia due to affection of the motor speech zone of the cerebral cortex, where the speech motor program is formed. Muscular movements of speech apparatus are one type of voluntary muscular movements. The synthesis of effective methods, techniques and technologies of personalized voluntary movements restoration is an actual scientific and applied task.

## **PROBLEM STATEMENT**

The complete motor functions rehabilitation is associated with the adequate mobilizing of the patient's reserves on restoration of affected or lost functions according to his state. Therefore, the movements deficit diagnostics after stroke at each rehabilitation stage plays an important role, especially with methods and tools of digital medicine, which provides of quantitative assessment of disorders depth.

As a result of previous studies, a new technique for quantitative assessment of motor functions deficit after stroke has been developed. This technique was based on main and additional expert evidence criteria [2], and has passed prior clinical approbation during researches of movements restoration dynamics after stroke by new technology TRENAR® for training / restoring the motor functions [3]. The test results confirmed the technique advantages and feasibility of its using in clinical practice [2].

Recently, more and more attention is paid to attempts to apply artificial intelligence (AI) technologies in medicine [4, 5]. "AI is poised to play an increasingly prominent role in medicine and healthcare because of advances in computing power, learning algorithms and the availability of large datasets (big data) sourced from medical records and wearable health monitors" [6]. It is considered that "artificial intelligence in a smartphone will make available the medicine of future to everyone: any mobile phone user will have a personal medical assistant, capable in real time mode to solve problems related to specific person's health. ... And it is not yet known, when artificial intelligence will be good enough to make 100 % accurate recommendations to physicians about the best treatment. However, AI is already able to make medical personnel work much easier, improve the diagnostics accuracy and help patients in solving everyday tasks." [7].

As for the movements deficit diagnostics after stroke, this new approach provides of using the specialized software modules as "virtual assistants" to physician in making diagnostic decisions in the diagnostic process.

The implementation of AI tools, in particular for personalization and expanding the functionality of diagnostic process, reducing the expert's error and identifying the stroke disorders specifics, personalization of the preventive and rehabilitation measures, will increase the effectiveness and mass usage of the rehabilitation services for patients after stroke, will improve the quality of these services. In combination with telemedicine services such technologies will expand access for patients to qualitative medicine.

**The purpose of the paper** is to develop information technology for diagnostics of motor functions deficit after stroke, that uses artificial intelligence tools to increase the effectiveness of the diagnostic process.

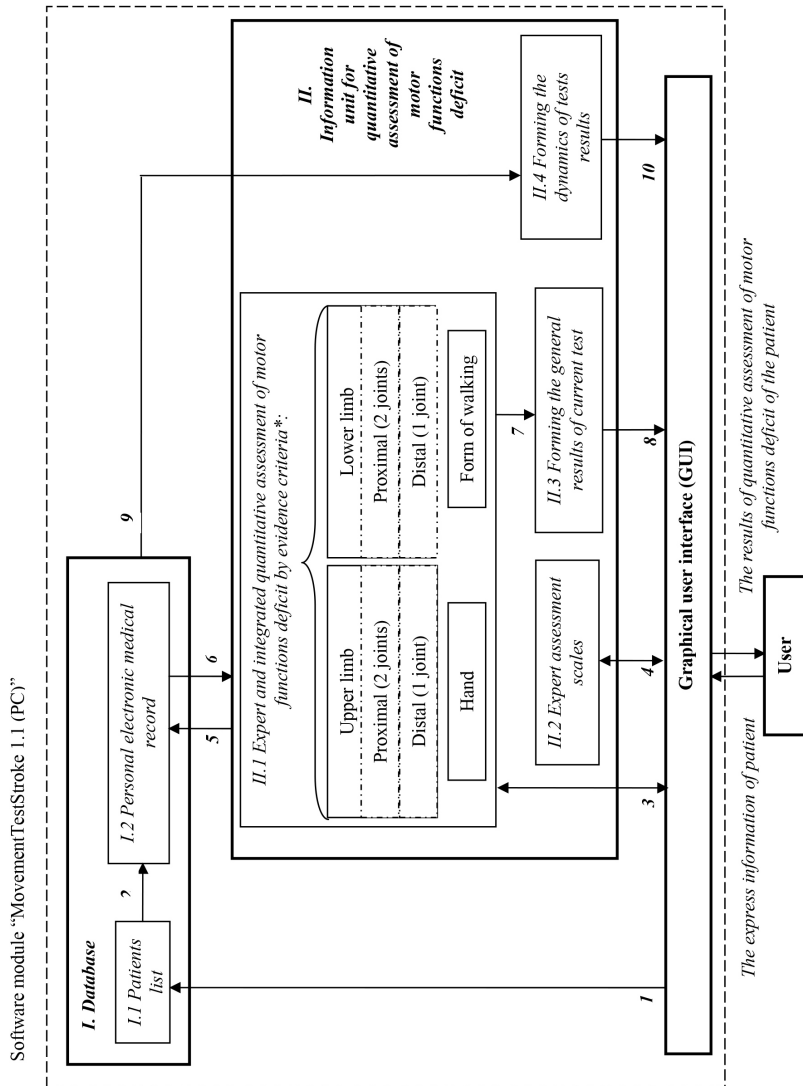
## **INFORMATION ASSISTANCE FOR PERSONALIZED MOTOR FUNCTIONS DIAGNOSTICS BASED ON THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TOOLS**

The process of personalized motor functions diagnostics based on the use of artificial intelligence tools – specialized software modules of information assistance to the physician in diagnosing limbs movements after stroke "Movement-TestStroke 1.1 (PC)" for personal computer, and "MovementTestStroke 1.1 (MD)" for mobile devices are presented and described by appropriate structural and functional models (Fig. 1, Fig. 2).

*Structural and functional model of user – software module interaction for quantitative assessment of motor functions in patient «MovementTestStroke 1.1 (PC)» in the structure of personal computer* is shown on Fig. 1. This software module consists of the graphical user interface (GUI) and the module's objects — main information units: **I** — *Database*, **II** — *Information unit for quantitative assessment of motor functions deficit* (hereinafter — *Assessment unit*).

These units are connected with GUI that provides for user a dialog operation mode with them:

- inputting the patient's express information to Database through the GUI, calling the patient's motor functions deficit assessment information during the current course or for previous rehabilitation courses (1);
- creating the access to patient's personal electronic medical record (EMR) in Database, sending the request to display of dynamics of patient's motor functions deficit assessment during the current course or for previous rehabilitation courses to Database (2);
- selecting the motor functions tested object (limb, hand, form of walking) through the GUI, inputting the quantitative indicators of motor functions deficit by evidence criteria in points in relevant tables of tested object (3);
- displaying the scales of motor functions expert assessment by user (physician) according to tested object by main and additional evidence criteria, and determination of quantitative indicators of motor functions deficit in points on their basis (4);
- storing the current results of distributed expert and integrated quantitative assessment of motor functions in points in Database (5);
- loading the data of integral quantitative assessment of motor functions in points of the first test to assess the motor functions restoration effectiveness (6);
- sending the results of current distributed expert and integrated quantitative assessment of motor functions for forming their imaging in tabular form (7);
- outputting the general results of the distributed expert and integrated quantitative assessment of motor functions in tabular form to user (physician) through the GUI (8);
- loading the data on dynamics of motor functions deficit assessment in points during the current course or for previous rehabilitation courses (9);
- outputting the dynamics of patient's motor functions deficit assessment during the current course or for previous rehabilitation courses through the GUI in tabular and graphical forms (10).



Note: \* – explanations are in the text.

**Fig. 1.** Structural and functional model of user — software module interaction for quantitative assessment of motor functions in patient "MovementTestStroke 1.1 (PC)" (marking descriptions are in the text)

Information unit I "Database" is designed for storing the information on each patient who has already passed or patient's limbs motor functions are tested for the first time, and consists of two components: I.1 "List of patients" and I.2 "Personal electronic medical record".

The component I.1 is formed in tabular list form, in which each patient is shown by express information record (hospitalization date, patient's surname-initials-sex, medical card number, physician's name) according to the standard (form 003/o "Medical card of patient"). According to object-oriented programming (OOP) methods, the user checks (1) the presence of right patient through the GUI, and if patient is absent, user adds (1) to Database patient's express

information from the medical card. The presence of the patient in the list makes it possible to create (2) access to personal EMR in *Database*.

In component *I.2 of Database* the results of distributed expert and integrated quantitative assessment of motor functions deficits according to evidentiary criteria throughout the course of patient rehabilitation are stored.

The purpose of *Information unit II — Assessment unit* is for inputting (3) the expert assessment data of motor functions deficit in points by evidence criteria according to evaluation scales by user (physician) through the GUI, quantitative assessment of movements deficit, outputting (8) the general results of distributed and integrated quantitative assessment, and their dynamics (10) during patient's rehabilitation course through the GUI.

According to the purpose this unit consists of components: *II.1 "Distributed expert and integrated quantitative assessment of motor functions deficit by evidence criteria"*, *II.2 "Expert assessment scales"*, *II.3 "Formation of generalized results of current test"*, *II.4 "Forming the dynamics of test results"*.

In component *II.1 of motor functions Assessment unit*, the user carries out distributed expert assessment based on appropriate scales of the Protocol for quantitative assessment of movements deficit of patient after stroke [8]:

- by main evidence criteria (muscle strength, movement's volume) [9] of movements deficit of upper and lower limbs at the individual joint level in proximal (2 joints) and distal (1 joint) parts;
- by additional evidence criteria of fine motor skills of the hand (contrasting the thumb, flexing the hand's fingers in fist, the hand's main motor function (capturing), the hand's fingers extension) and form of walking [8, 10];
- of muscle hyper- or hypotone [8, 9].

And also integrated quantitative assessments at the individual joint level of specified parts of upper and lower limbs or hand are calculated by the program.

It is the implementation of additional evidence criterion for hand's fingers extension that "MovementTestStroke 1.1 (PC)" differs from the previously developed "MovementTestStroke 1.0 (PC)" [8, 11].

The functional purpose of component *II.1* is the separate presentation of motor functions tested objects (limb, hand, form of walking) and their evidence criteria in tabular form. Motor functions deficit at the individual joint level of proximal and distal parts of upper and lower limbs, fine motor skills of the hand and form of walking can be assessed by choice. The user through the GUI selects (3) tested object, calls expert assessment scales by evidence criteria according to tested object on the GUI (4), determines the quantitative indicators of the motor functions deficit in points, and inputs them (3) in appropriate tables of tested object.

Then the program calculates the integrated assessments of motor deficit by amount of evidence criteria: for the limbs — by two criteria, for fine motor skills of the hand — by four criteria, and determines the paresis degree (plegia, severe paresis, major paresis, moderate paresis, mild paresis, disorders absence).

If patient's motor functions test is performed not for the first time in rehabilitation course, the component *II.1* receives (6) integrated assessments data of motor functions deficit of the first test from component *I.2 of Database*. The motor functions restoration effectiveness is calculated by comparing the integrated assessments for current and first tests in component *II.1*.

The current test results of motor functions in points and motor functions restoration effectiveness are stored (5) in component *I.2* of *Database*.

From component *II.1* the results of distributed expert and integrated quantitative assessment of motor functions deficit by evidence criteria of patient current test are sent (7) to the component *II.3*, and are output (8) in tabular form to user through the GUI.

Data of distributed expert and integrated quantitative assessment of patient's motor functions deficit for current and previous tests in current rehabilitation course are received (9) from component *I.2* of *Database* to component *II.4* of *Assessment unit* to form the dynamics of both expert and integrated quantitative assessment of motor functions deficit, and are output to user through the GUI (10) in tabular and graphical form.

In addition the dynamics of patient's motor functions deficit during the current or for previous rehabilitation course can be viewed by user without testing. To do this in the *Database* the request (1) to component *I.1* is transmitted (2) to component *I.2*, and the appropriate motor functions test data are transmitted (9) to component *II.4* of *Assessment unit*. The generated dynamics is output (10) to user through the GUI in tabular and graphical form.

*Structural and functional model of user — software module interaction for quantitative assessment of motor functions in patient "MovementTestStroke 1.1 (MD)" on mobile devices* is shown on Fig. 2. This software module consists of the GUI and module's objects – the main information units: *I* — *Database*, *II* — *Information unit for quantitative assessment of motor functions deficit (or Assessment unit)*.

These units are connected with GUI that provides for user a dialog operation mode with them:

- inputting the patient's express information to *Database* through the GUI (1);
- creating the access to patient's personal electronic medical record (EMR) in *Database* (2);
- selecting the motor functions tested object (limb, hand, form of walking) through the GUI with evidence criteria for its assessment, and then selecting the right verbal characteristic on the assessment scale by selected evidence criterion, outputting the quantitative indicator of motor functions deficit in points by selected evidence criterion through the GUI (3);
- program calling the motor functions deficit assessment scale by evidence criterion according to the tested object (4);
- sending the results of current test's results of distributed expert assessment of motor functions to calculate the integrated assessments and forming their imaging in tabular form (5);
- outputting the general results of distributed expert and integrated quantitative assessment of motor functions, and motor functions restoration effectiveness to user (physician) through the GUI (6);
- loading the data of integrated quantitative assessment in points of the first test to assess the motor functions restoration effectiveness (7);
- storing the current results of distributed expert and integrated quantitative assessment of motor functions in points in *Database* (8).

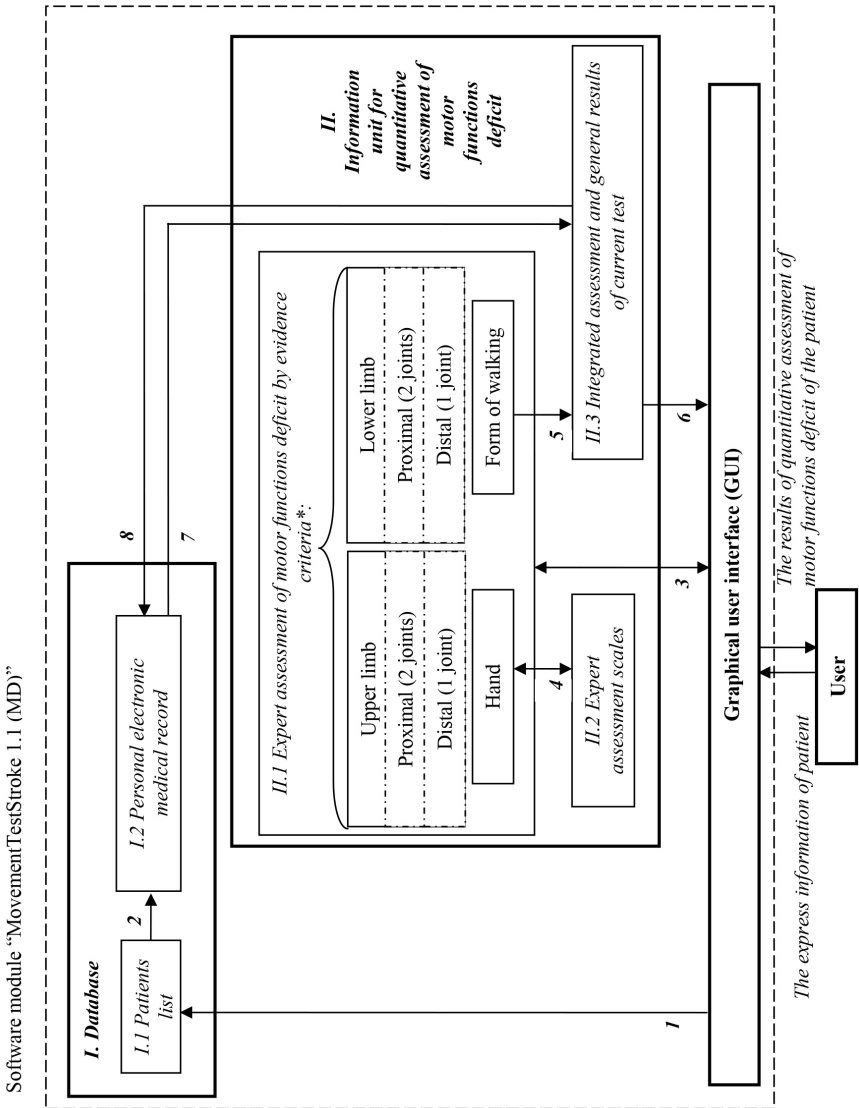
The purpose and structure of *Information unit I "Database"* corresponds to *Database* in the structure of personal computer.

As for the *Information unit II "Assessment unit"* for mobile devices, it should be noted that the purpose of the unit corresponds to similar unit for personal computer, except the function of forming the dynamics of motor functions

test results (this component is absent). In addition the limitation of the mobile devices screen size causes a difference in relationship between user and information units, their components through the GUI, and also the components functions redistribution of Assessment unit.

These differences are reflected in algorithms for personal computer and mobile devices (appropriately Fig. 4, Fig. 5).

Thus, in component *II.1* of *Assessment unit* the assessment is carried out similarly to component *II.1* in personal computer, except the calculation of integrated quantitative assessment of limbs and hand, which is carried out in component *II.3*.



Note: \* – explanations are in the text.

**Fig. 2.** Structural and functional model of user — software module interaction for quantitative assessment of motor functions in patient "MovementTestStroke 1.1 (MD)" (marking descriptions are in the text)

As there is no component of dynamics formation in *Assessment unit* for mobile devices, the calculation of motor functions restoration effectiveness value takes place in component *II.3*.

The user through the GUI selects (3) the tested object and evidence criteria for its assessment in component *II.1*. And the appropriate assessment scales by selected evidence criteria according to the tested object are output on the GUI (4). The user selects (3) the right verbal characteristic of criterion through the GUI. By this characteristic the quantitative indicator of motor functions deficit in points is calculated by program and is output on the GUI (3).

Expert assessments of motor functions deficit in points of current test are sent (5) to component *II.3*, where calculating of the integrated assessments for user-selected tested objects, determination of paresis degree, and output (6) of the general results of distributed expert and integrated quantitative assessment of motor functions deficit of current test through the GUI take place. If the patient's motor functions testing is not performed for the first time in the rehabilitation course, integrated assessments of motor functions deficit of the first test are automatically loaded to component *II.3* (7) from component *I.2* of the *Database*. The motor functions restoration effectiveness is calculated in component *II.3* by comparing the integrated assessments for current and first tests, and also is output (6) to user through the GUI.

The results of distributed expert and integrated quantitative assessment of motor functions deficit for current test, and motor functions restoration effectiveness are stored (8) in component *I.2* of *Database*.

The migration to mobile devices compared to personal computer provides for limiting in time the distribution of information presentation on mobile device's screen. According to motor functions tested object, the user through the GUI calls the assessment scale for selected evidence criterion, tests the motor functions and selects on the scale the verbal characteristic value relevant to this criterion. The comparison of indicators for information assistance to the physician in movements deficit assessment for personal computer and mobile devices are presented in Table. 1.

**Table 1. The indicators for information assistance to the physician in patient's movements deficit assessment after stroke for personal computer and mobile devices**

Personal computer	Mobile devices
Expert quantitative assessment of movements deficit by evidence criteria in points (from 0 to 5 points)	
Expert quantitative assessment of limb's muscle tone in points (from -5 to 0 for hypotone, from 0 to +5 for hypertone)	
Integrated quantitative assessment of movements deficit in points depending on criteria amount (from 0 to 10 for limbs, from 0 to 20 for fine motor skills of the hand)	
The paresis degree by integrated quantitative assessment in grades: plegia, severe paresis, major paresis, moderate paresis, mild paresis, disorders absence.	
Dynamics of motor functions deficit according to expert and integrated quantitative assessments in tabular and graphic forms (both in testing and through <i>Database</i> ).	Are absent
Motor restoration effectiveness by comparing integrated quantitative assessments of current and first motor functions tests in grades: unchanged, minor improvement, improvement, major improvement.	

## ALGORITHMS FOR MOTOR FUNCTIONS TESTING

According to the structural and functional models (Fig. 1, Fig. 2), the algorithms for motor functions testing by the software modules "MovementTestStroke 1.1" in the structure of personal computer (Fig. 4) and in the structure of mobile devices (Fig. 5) are aimed to quantitative assessment of patient's motor functions deficit.

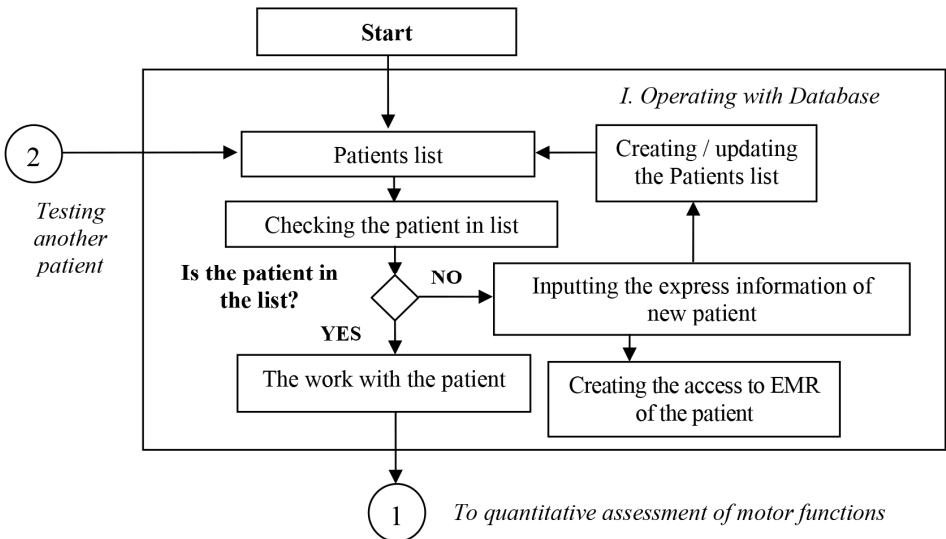
Movement testing begins with *I. Operating with Database* (Fig. 3): loading the patients list, checking the presence of the right patient in the list to assess motor functions by user (physician). Operating with Database is the identical part for algorithms for motor functions testing both for PC and mobile platforms.

If the list isn't yet created or such patient is absent, the user inputs express information from patient's medical record for creating / updating the patients list. At the same time the access to patient's personal electronic medical record (EMR) is created. Then the user returns to the updated list.

Then the user moves to operating with Information unit of quantitative assessment of motor functions deficit, where algorithm is separated both for PC and mobile platforms on two parts: *II.1 Quantitative assessment of motor functions deficit* and *II.2 Presentation of the results of quantitative assessment*.

In the structure of PC *II.1* the quantitative assessment of motor function deficit begins with selection of tested object of motor functions (limb, hand or form of walking) with the appropriate evidence-based assessment criteria (Fig. 4).

Based on the verbal characteristics, the user determines and fills quantitative indicators of the deficit in the appropriate tables. Based on these indicators in points, calculation of integrated assessment of deficit is performed and paresis degree for tested object is determined.



**Fig. 3.** Algorithm for motor functions testing by software module "MovementTestStroke 1.1". Identical part for PC and mobile devices — Operating with Database

If it is necessary, the user may test another object. Otherwise there is a transition to *II.2 Presentation of the results of quantitative assessment*.

In case of sufficient information for assessing the motor functions restoration effectiveness of selected tested objects, the integrated assessments of motor functions, deficit for these objects of the first test are loaded from component *I.2* of *Database*.

The effectiveness is determined by comparing the integrated assessments for current and first tests, and isn't determined in case of data absence of the first test for selected tested object.

The results of motor functions of current test and motor restoration effectiveness (in case of its presence) are stored in component *I.2* of *Database* and are displayed by program on the GUI.

If there is enough information to view the dynamics of test results, the data of distributed expert and integrated assessments of the deficit of motor functions for current and previous tests are downloaded from personal EMR to display them on the GUI.

At the end of work with current patient the user can test another patient or finish the program.

Limitation of screen size of mobile devices causes a difference in the relationship between the user and the information units, their components through the GUI, and the redistribution of functions of the *Assessment unit* components (Fig. 2). This difference is reflected in the algorithm for mobile devices (Fig. 5) and takes place when user selects tested object.

In the structure of mobile platforms (Fig. 5) the verbal characteristics for each criterion are displayed on the GUI according to tested object. The user selects a verbal characteristic that corresponds to the motor function deficit according to selected criterion. According to this characteristic, a quantitative indicator of motor functions deficit in points is automatically determined and displayed on the GUI.

If it is necessary, the user may test another object. Otherwise for selected tested objects the integrated assessments of deficit are calculated and the paresis degrees are determined.

Then there is a transition to *II.2 Presentation of the results of quantitative assessment*, and the testing algorithm continues as for personal computer (Fig. 4, Fig. 5).

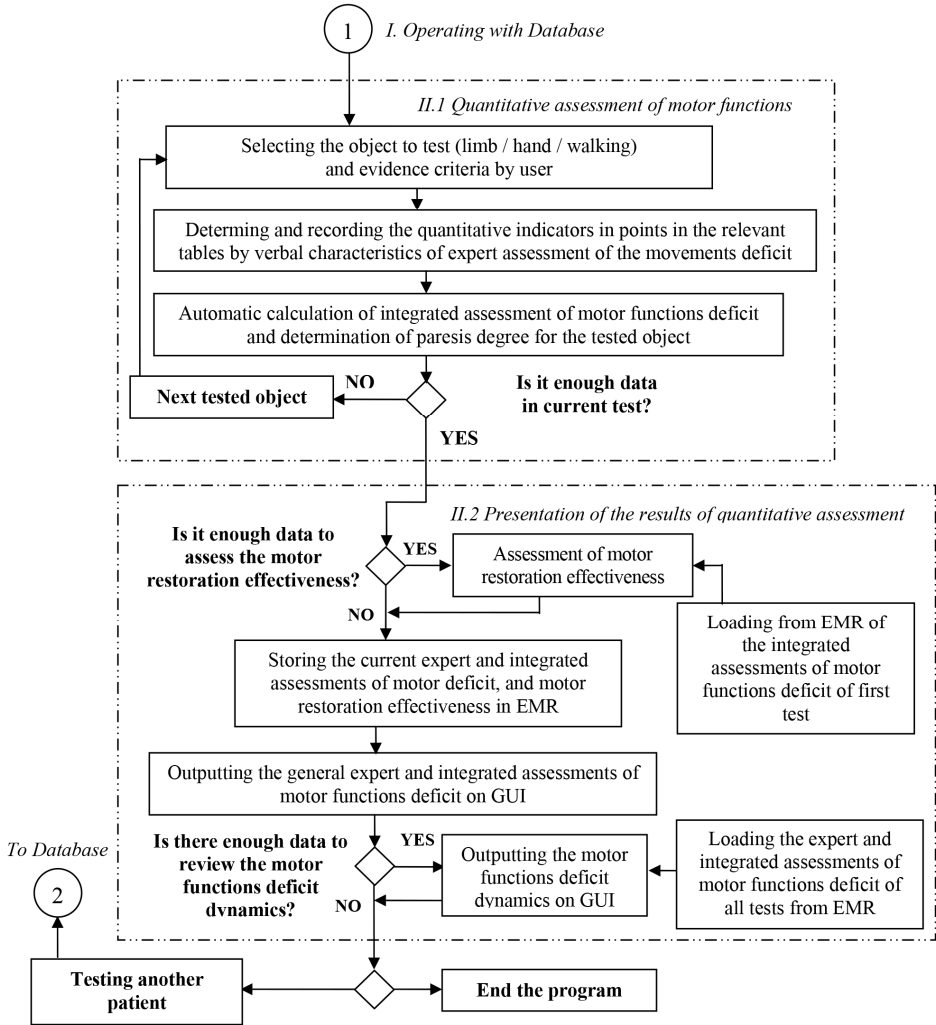
## **ACTIVITY DIAGRAMS OF SOFTWARE MODULES FOR PERSONAL COMPUTER AND MOBILE DEVICES**

UML-activity diagrams of specialized software modules "MovementTestStroke 1.1 (PC)" (Fig. 7) and "MovementTestStroke 1.1 (MD)" (Fig. 8) describe sequential and parallel calculations by these modules according to the testing algorithms (Fig. 4, Fig. 5). Operating with Database is the identical part for UML-activity diagrams both for PC and mobile platforms (Fig. 6).

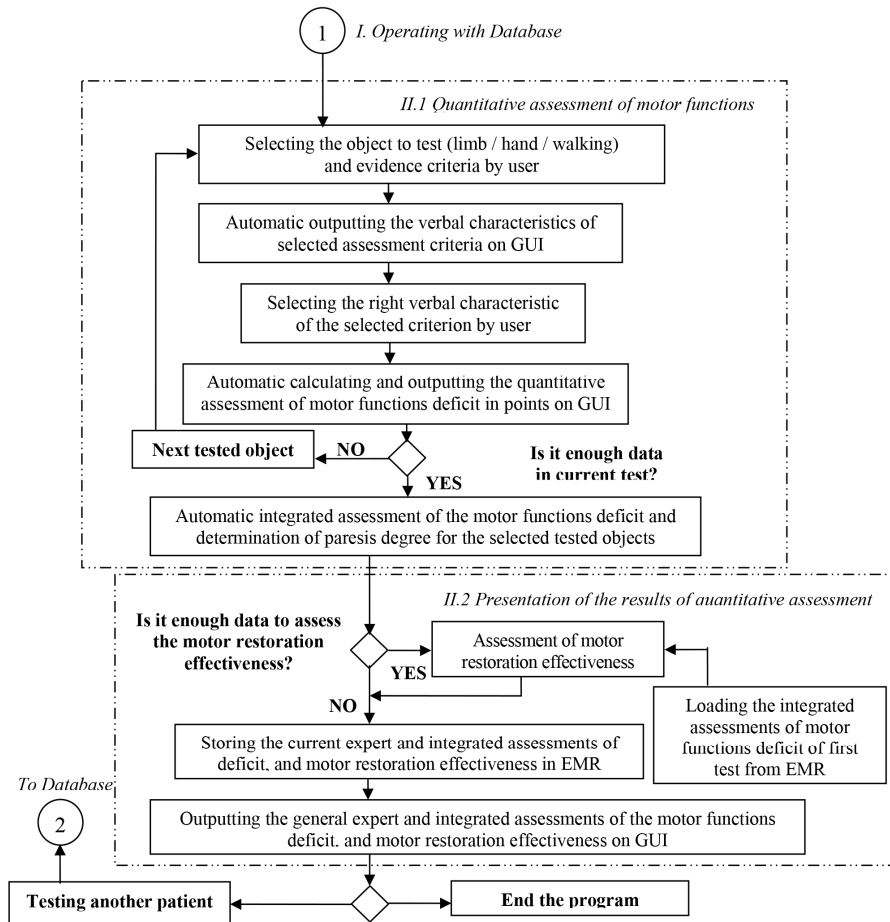
The diagrams show the nodes of decisions and associations ("diamonds"), which are an analog to the logical function "OR", synchronization lines, which are an analog to the logical function "AND", initial and final activity nodes (appropriately "Start program" and "End program" (Fig. 5-Fig. 7) according to UML-notation [12, 13].

The software modules are built so that you can return to the previous stage from each subsequent stage. Quantitative indicators of motor functions deficit for each evidence criterion for tested object, as well as an integrated assessment of motor functions

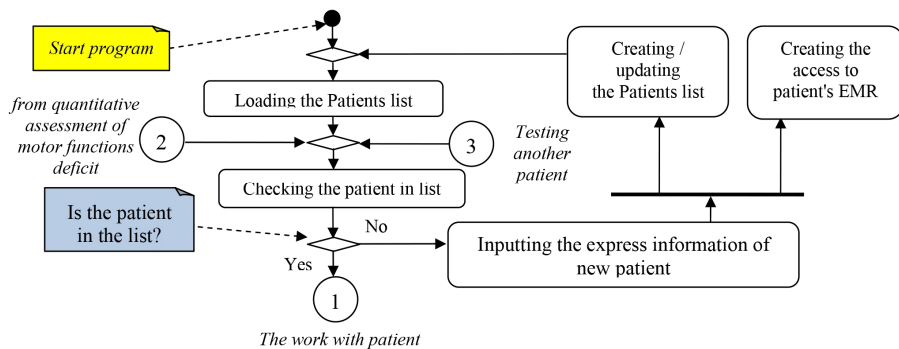
deficit are obtained in different ways for the structure of personal computer and mobile devices. For the personal computer the integrated assessment of particular tested object is provided immediately after obtaining the quantitative indicators in points for all criteria, but for mobile devices — only after assessment in points of all selected tested objects by all criteria.



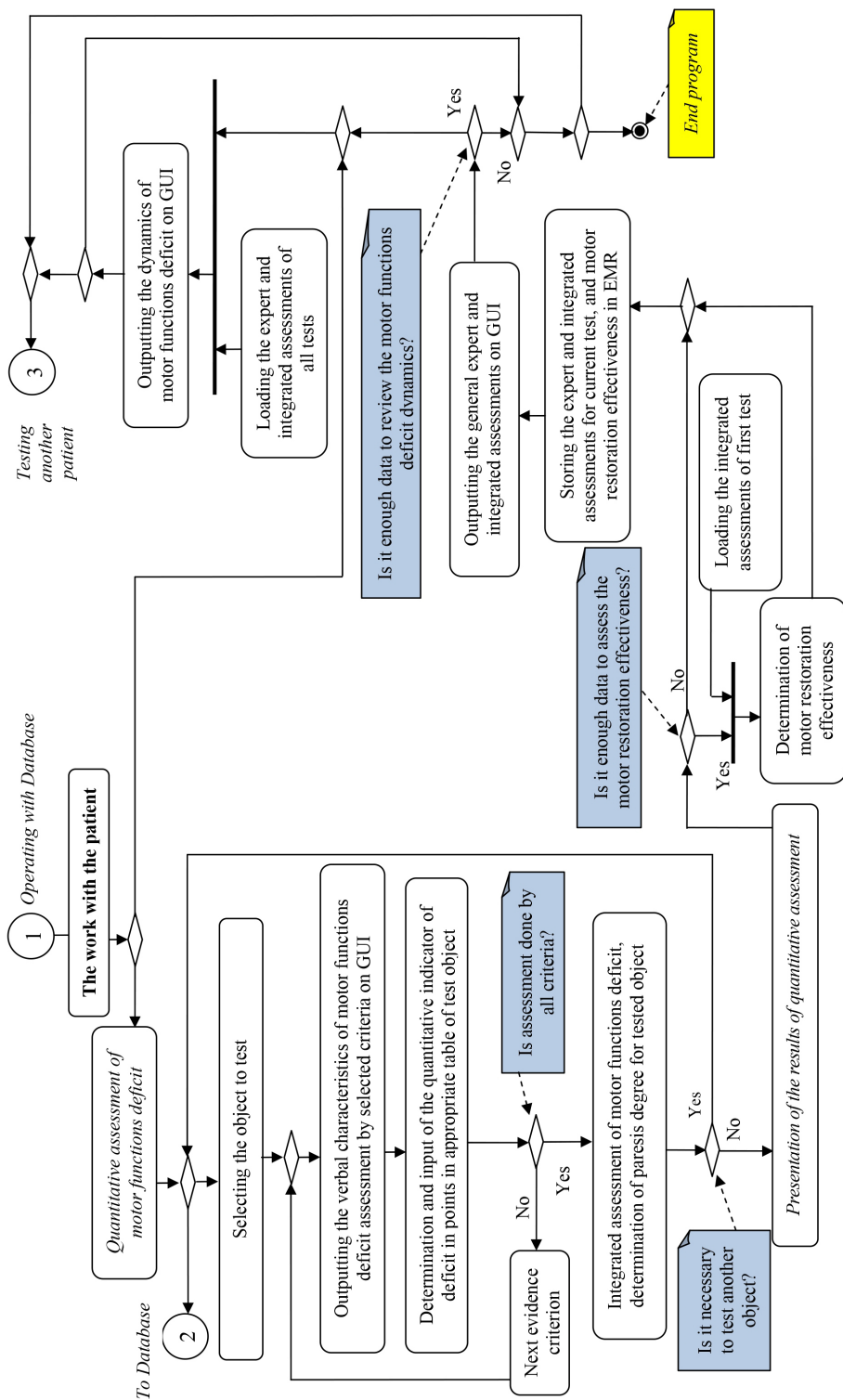
**Fig. 4.** Algorithm for motor functions testing by software module "MovementTestStroke 1.1". Operating with Information unit of quantitative assessment of motor functions deficit for PC



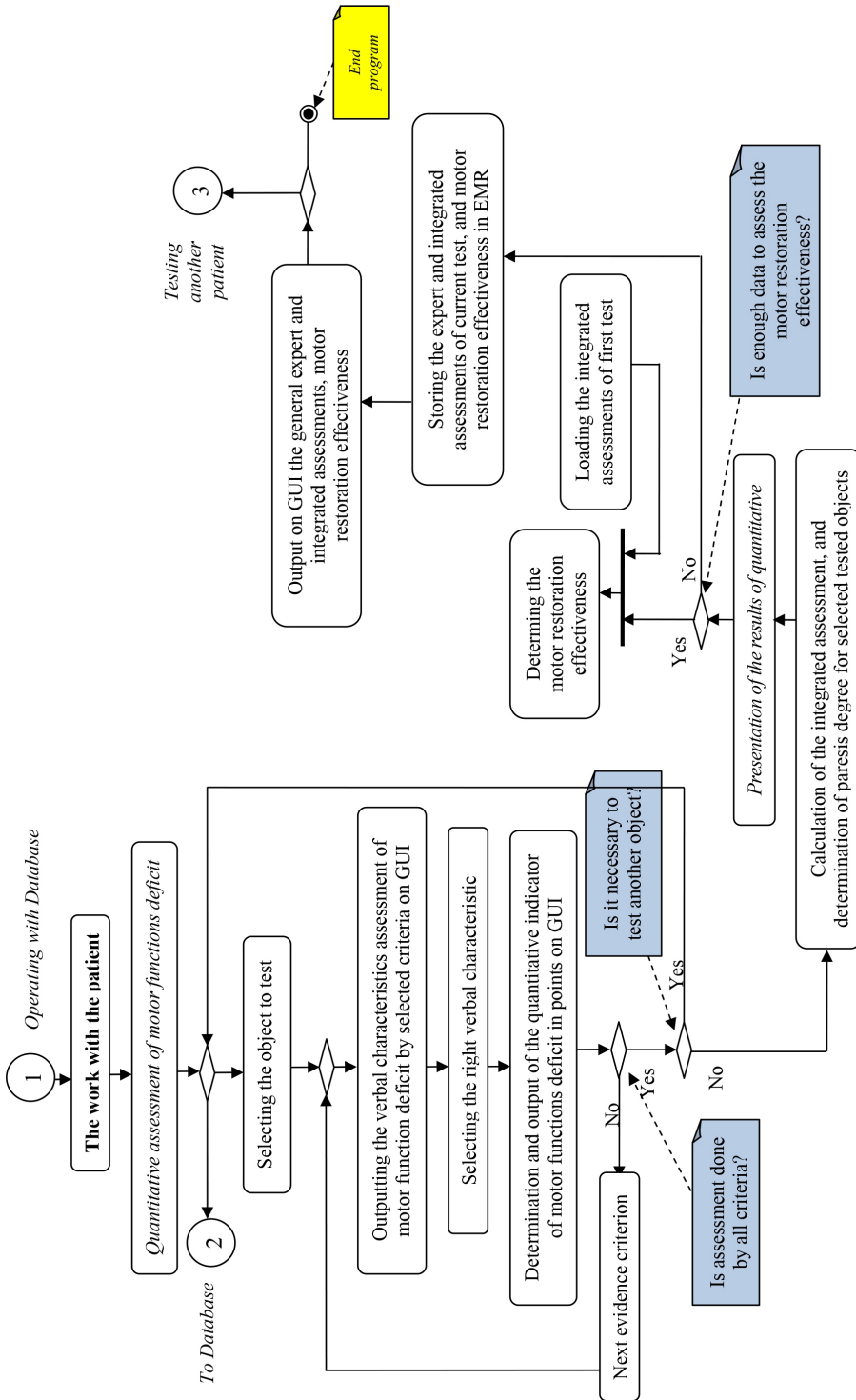
**Fig. 5.** Algorithm for motor functions testing by software module "MovementTest-Stroke 1.1". Operating with Information unit of quantitative assessment of motor functions deficit for mobile devices



**Fig. 6.** UML-activity diagram of the software module "MovementTestStroke 1.1". Identical part for PC and mobile devices — Operating with Database



**Fig. 7.** UML-activity diagram of the software module "MovementTestStroke 1.1 ". Operating with Information unit of quantitative assessment of motor functions deficit for PC



**Fig. 8.** UML-activity diagram of the software module "MovementTestStroke 1.1". Operating with Information unit of quantitative assessment of motor functions deficit for mobile devices

Thus, artificial intelligence was used to increase the effectiveness of the diagnostic process of motor functions deficit after stroke. As artificial intelligence tools, a new class of specialized software modules for motor functions diagnostics "MovementTest-Stroke 1.1 (PC)" for PC-structure, and "MovementTestStroke 1.1 (MD)" for mobile platforms running under Android operation system were developed. Software implementation — Visual Studio 2019, C# programming language. Structural and functional models of physician — software modules interaction, algorithms for motor functions deficit diagnostics, and UML-activity diagrams of these modules were developed.

## CONCLUSIONS

The advantage of diagnosing is the usage of individual norm. Assessment of motor functions of the affected limbs is performed relative to the patient's own healthy limbs. The same six-step gradation of paresis degree, and generally accepted verbal assessment of effectiveness (no change, slight improvement, improvement, significant improvement) reduce the physician's error.

An expanded range of evidence criteria for assessing the motor functions deficit that includes integrated assessment of limbs at the level of individual joints by two criteria, in addition to the hand — by four criteria, the form of walking, muscle hyper- or hypotone, makes it possible to identify the disorders specifics and fulfill comparative analysis of the deficit.

Storing in the Database and displaying on the Interface the results of deficit assessment, deficit dynamics during rehabilitation course in a user-friendly form (tables, graphs) also helps to reduce physician's error in motor functions diagnosing, helps to prevent complications, identify disorders specifics, compare effectiveness of upper and lower limbs, their distal and proximal parts including fine motor skills of the hand, the restoration of which helps to restore oral speech in the case of motor or motor and sensory aphasia.

Mobile AI-technology for motor functions diagnostics can be used not only after a stroke, but also traumatic brain injury, brain tumors, etc. The mobility creates conditions for its mass usage in clinical, outpatient settings, at home, in educational programs.

The implementation of artificial intelligence tools for diagnostics of motor disorders helps to increase the effectiveness of diagnostics and, as a consequence, rehabilitation services for patients.

## REFERENCES

1. Norrving Bo. Action Plan for Stroke in Europe 2018–2030. *European Stroke Journal*. 2018. Vol. 3(4). pp. 309–336.
2. Vovk M.I., Kutsiak O.A., Laut A.D., Ovcharenko M.A. Information Assistance of Researches on the Dynamics of Movement Restoration After the Stroke. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2017, № 3 (189), pp. 61–78. (in Ukrainian)
3. Gritsenko V.I., Vovk M.I. Trenar - Innovative Technology of Restoration of Movements. *Science and Business - the basis of economic development: materials of the International Scientific and Practical Forum*. Ukraine, Dnipropetrovsk, 2012, pp. 204–206. (in Russian)
4. Varun H Buch, Irfan Ahmed, Mahiben Maruthappu. Artificial intelligence in medicine: current trends and future possibilities. *Br J Gen Pract*. 2018. № 68(668). pp. 143–144.
5. Bernard Marr. The 9 Biggest Technology Trends That Will Transform Medicine And Healthcare In 2020. URL: <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2019/11/01/the-9-biggest-technology-trends-that-will-transform-medicine-and-healthcare-in-2020/?sh=6db7334072cd> (Last accessed: 1.04.2021)

6. Ahuja A.S. The impact of artificial intelligence in medicine on the future role of the physician. *PeerJ*. 2019. URL: <http://doi.org/10.7717/peerj.7702> (Last accessed: 1.04.2021)
7. Artificial intelligence in medicine: the main trends in the world. URL: [https://medaboutme.ru/zdorove/publikacii/stati/sovety\\_vracha/iskusstvennyy\\_intellekt\\_v\\_meditsine\\_glavnye\\_trendy\\_v\\_mire/](https://medaboutme.ru/zdorove/publikacii/stati/sovety_vracha/iskusstvennyy_intellekt_v_meditsine_glavnye_trendy_v_mire/) (Last accessed: 1.04.2021) (in Russian).
8. Vovk M.I., Kutsyak O.A. Software module for personal diagnostics of motor functions after stroke. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2019, № 4 (198), pp. 62–77.
9. Belova A., Shchetetova O. Scales, tests and questionnaires in medical rehabilitation. Moscow: Antidor, 2002. 440 p. (in Russian)
10. Smychek V., Ponomareva E. Craniocerebral trauma (clinic, treatment, examination, rehabilitation). Minsk: Research Institute of ME and R, 2010. 430 p. (in Russian)
11. Certificate of registration the copyright "Computer program «Diagnostics of deficit of general limb movement, fine motor skills of the hand, walking form by the technique for quantitative assessment of movements deficit in patients after stroke "MovementTest-Stroke 1.0 (PC)"»" / M.I. Vovk, O.A. Kutsiak (Ukraine); No. 98161; published dated 16.06.2020 (in Ukrainian).
12. Booch G., Rumbaugh J., Jacobson I. The Unified Modeling Language User Guide. Boston: Addison-Wesley Professional, 1998. 391 p.
13. Fowler M. UML Distilled: A Brief Guide to the Standard Object Modeling Language. Boston: Addison-Wesley Professional, 2004. 175 p.

Received 01.04.2021

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Norrving Bo. Action Plan for Stroke in Europe 2018–2030. *European Stroke Journal*. 2018. Vol. 3(4). pp. 309–336.
2. Вовк М.І., Куцяк О.А., Лаута А.Д., Овчаренко М.А. Інформаційний супровід досліджень динаміки відновлення рухів після інсульту. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2017. №3 (189). С. 61–78.
3. Гриценко В.И., Вовк М.И. Тренар — инновационная технология восстановления движений. *Наука і бізнес – основа розвитку економіки: матеріали Міжнародного науково-практичного форуму*. Дніпропетровськ, 2012. С. 204–206.
4. Varun H Buch, Irfan Ahmed, Mahiben Maruthappu. Artificial intelligence in medicine: current trends and future possibilities. *Br J Gen Pract*. 2018. № 68(668). pp. 143–144.
5. Bernard Marr. The 9 Biggest Technology Trends That Will Transform Medicine And Healthcare In 2020. URL: <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2019/11/01/the-9-biggest-technology-trends-that-will-transform-medicine-and-healthcare-in-2020/?sh=6db7334072cd> (Дата звернення: 1.04.2021)
6. Ahuja A.S. The impact of artificial intelligence in medicine on the future role of the physician. *PeerJ*. 2019. URL: <http://doi.org/10.7717/peerj.7702> (Дата звернення: 1.04.2021)
7. Искусственный интеллект в медицине: главные тренды в мире. URL: [https://medaboutme.ru/zdorove/publikacii/stati/sovety\\_vracha/iskusstvennyy\\_intellekt\\_v\\_meditsine\\_glavnye\\_trendy\\_v\\_mire/](https://medaboutme.ru/zdorove/publikacii/stati/sovety_vracha/iskusstvennyy_intellekt_v_meditsine_glavnye_trendy_v_mire/) (Дата звернення: 1.04.2021).
8. Vovk M.I., Kutsyak O.A. Software module for personal diagnostics of motor functions after stroke. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2019. № 4 (198). pp. 62–77.
9. Белова А., Щепетова О. Шкалы, тесты и опросники в медицинской реабилитации. М.: Антидор, 2002. 440 с.
10. Смычек В., Пономарева Е. Черепно-мозговая травма (клиника, лечение, экспертиза, реабилитация). Мн.: НИИ МЭ и Р, 2010. 430 с.
11. Свідोцтво про реєстрацію авторського права на твір. «Комп'ютерна програма «Діагностика дефіциту загальних рухів кінцівок, тонкої моторики кисті, форми ходи за методикою кількісного оцінювання дефіциту рухових функцій у пацієнтів після інсульту "MovementTestStroke 1.0 (PC)"» / М.І. Вовк, О.А. Куцяк (Україна); № 98161 опубл. від 16.06.2020.

12. Booch G., Rumbaugh J., Jacobson I. The Unified Modeling Language User Guide. Boston: Addison-Wesley Professional, 1998. 391 p.
13. Fowler M. UML Distilled: A Brief Guide to the Standard Object Modeling Language. Boston: Addison-Wesley Professional, 2004. 175 p.

Отримано 01.04.2021

*Вовк М.І.*, канд. біол. наук, старш. наук. співроб.,  
зав. відд. біоелектричного керування та медичної кібернетики  
ORCID: 0000-0003-4584-9553

e-mail: vovk@irtc.org.ua; imvovk3940@gmail.com

*Куцяк О.А.*, канд. техн. наук,  
старш. наук. співроб. відд. біоелектричного керування та медичної кібернетики  
ORCID: 0000-0003-2277-7411

e-mail: spirotech85@ukr.net

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

## AI-ТЕХНОЛОГІЯ ДІАГНОСТИКИ РУХОВИХ ФУНКЦІЙ ПІСЛЯ ІНСУЛЬТУ

**Вступ.** Діагностика рухових функцій відіграє важливу роль у відновному лікуванні рухів після інсульту. Синтез ефективних технологій з персоналізованого оцінювання порушень рухових функцій на різних етапах реабілітації є актуальним науково-прикладним завданням.

**Мета дослідження** — розробити інформаційну технологію діагностики дефіциту рухових функцій після інсульту, яка для підвищення ефективності діагностичного процесу використовує елементи штучного інтелекту.

**Результати.** Розроблено теоретичні і практичні засади синтезу AI-технології діагностики дефіциту рухових функцій після інсульту та оцінювання ефективності їхнього відновлення внаслідок реабілітаційних заходів. Для інформаційної допомоги лікарю у діагностичному процесі використовуються елементи штучного інтелекту — новий клас засобів мобільної цифрової медицини, спеціалізовані програмні модулі діагностування рухових функцій «MovementTestStroke 1.1 (PC)» для структури персонального комп'ютера і «MovementTestStroke 1.1 (MD)» для мобільних платформ під керуванням операційної системи Android. Надано структурно-функційні моделі взаємодії лікаря з програмними модулями, алгоритми діагностики дефіциту рухових функцій, UML-діаграми діяльності зазначених модулів. Програмна реалізація — середовище Visual Studio 2019, мова програмування — C#.

Функційні особливості технології: розширена гама доказових критеріїв персоналізованого кількісного оцінювання дефіциту рухів кінцівок, збереження у базі даних і відображення на інтерфейсі результатів оцінювання дефіциту, а також динаміки дефіциту впродовж курсу реабілітації у зручному для лікаря вигляді (таблиці, графіки), що запроваджено у технологію, уможливають зменшення помилки лікаря, запобігання розвитку ускладнень, виявлення специфіки порушень, порівняння ефективності реабілітації верхніх-нижніх кінцівок, їхніх дистальних і проксимальних відділів, у тому числі тонкої моторики кисті, відновлення якої сприяє відновленню мовлення у разі моторної або моторно-сенсорної афазії.

**Висновки.** Використання засобів штучного інтелекту для діагностики дефіциту рухових функцій сприятиме підвищенню ефективності діагностичних і, як наслідок, реабілітаційних послуг пацієнтам після інсульту.

**Ключові слова:** діагностика, рухові функції, інсульт, персональна кількісна оцінка, критерії, технологія, штучний інтелект, програмний модуль, структурно-функційна модель, алгоритм, діаграма діяльності.

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

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

### Вимоги до рукописів статей

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

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

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

### Вимоги до текстового файлу

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

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

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

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

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

### Передплату на журнал (друкована версія) в Україні здійснюють:

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