



Широков В.А.

академік Національної академії наук України, доктор технічних наук, професор  
директор Українського мовно-інформаційного фонду НАНУ, Київ, Україна,  
vshirokov48@gmail.com

## МОВА В МЕРЕЖЕЦЕНТРИЧНОМУ СВІТІ

У роботі аналізуються процеси зміни цивілізаційної ролі природної людської мови при переході до мережецентричної фази еволюції. Відзначається, що зростання інформації, що функціонує в Мережі, вже вийшло на експонентний режим і її обсяги вже не можуть бути ефективно оброблені, сприйняті і усвідомлені їхніми реципієнтами-адресатами. Таким чином, проблеми створення комп'ютерних інструментів, заснованих на принципах штучного інтелекту (проблеми інтелектуалізації Мережі), впевнено пересунулися на передній план актуальності, а серед багатьох аспектів інтелектуалізації особливо виділяється мова. Технологічний статус мови визначатиме характер розвитку цифрової мережецентричної цивілізації в найближчий період, а разом з цим - ієрархію мов, яка демонструватиме здатність мови тієї чи іншої національної або етнічної спільноти до успішної конкуренції в колі світових мов.

З метою збереження мовного розмаїття та відповідних мовних картин світу в статті пропонується організація «Всесвітнього Лінгвістичного Діалогу» як розподіленої мережевої системи соціально-професійної взаємодії в галузі лінгвістики у вигляді виртуалізованої науково-дослідницької та соціальної інфраструктури, лінгвістичних ресурсів та інструментів лінгвістичного дослідження і проектування. Обговорюються концептуальні характеристики і системні параметри «Всесвітнього Лінгвістичного Діалогу», а також науково-організаційні заходи, спрямовані на його створення.

**МЕРЕЖЕЦЕНТРИЧНИЙ СВІТ, ТЕХНОЛОГІЧНИЙ СТАТУС МОВИ, ВСЕСВІТНІЙ ЛІНГВІСТИЧНИЙ ДІАЛОГ, СИСТЕМА ЛІНГВІСТИЧНИХ РЕСУРСІВ ТА ЛІНГВІСТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ**

**Широков В. А. Языки в сетцентрическом мире.** В работе анализируются процессы изменения цивилизационной роли естественного человеческого языка при переходе к сетцентрической фазе эволюции. Отмечается, что рост информации, функционирующей в Сети, уже вышел на экспоненциальный режим и её объёмы уже не могут быть эффективно обработаны, восприняты и осознаны их реципиентами-адресатами. Таким образом, проблемы создания компьютерных инструментов, основанных на принципах искусственного интеллекта (интеллектуализации Сети), уверенно передвинулись на передний план актуальности, а среди множества аспектов интеллектуализации особенно выделяется язык. Технологический статус языка будет определять характер развития цифровой сетцентрической цивилизации в ближайший период, а вместе с этим – и иерархию языков, демонстрирующую способность языка той или иной национальной либо этнической общности к успешной конкуренции в кругу мировых языков.

С целью сохранения языкового разнообразия и соответствующих языковых картин мира в статье предлагается организация «Всемирного Лингвистического Диалога» как распределенной сетевой системы социально-профессионального взаимодействия в области лингвистики в виде виртуализированной научно-исследовательской и социальной инфраструктуры, лингвистических ресурсов и инструментов лингвистического исследования и проектирования. Обсуждаются концептуальные характеристики и системные параметры «Всемирного Лингвистического Диалога», а также научно-организационные меры, направленные на его создание.

**СЕТЦЕНТРИЧЕСКИЙ МИР, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ СТАТУС ЯЗЫКА, ВСЕМИРНЫЙ ЛИНГВИСТИЧЕСКИЙ ДИАЛОГ, СИСТЕМА ЛИНГВИСТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ И ЛИНГВИСТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

**Shirokov V.A. Languages in a network-centric world.** The paper analyzes the processes of changing the civilizational role of the natural human language during the transition to the network-centric phase of evolution. It is noted that the growth of information functioning on the Web has already reached an exponential mode and its volumes can no longer be effectively processed, perceived and realized by their recipients. Thus, the problems of creating computer tools based on the principles of artificial intelligence (Network intellectualization) have confidently moved to the forefront of relevance, and among many aspects of intellectualization, language is especially distinguished. The technological status of the language will determine the development modus of digital network-centric civilization in the near future, and with it the hierarchy of languages, demonstrating the ability of a language of one or another national or ethnic community to compete successfully in the world's circle.

In order to preserve linguistic diversity and the corresponding linguistic pictures of the world, the article proposes the organization of the World Linguistic Dialogue as a distributed network system of social and professional interaction in the field of linguistics in the form of a virtualized research and social infrastructure, linguistic resources and tools of linguistic research and design. The conceptual characteristics and system parameters of the World Linguistic Dialogue, as well as scientific and organizational measures aimed at its creation are discussed.

**NETWORK-CENTRIC WORLD, TECHNOLOGICAL STATUS OF THE LANGUAGE, WORLD LINGUISTIC DIALOGUE, A SYSTEM OF LINGUISTIC RESOURCES AND LINGUISTIC INFRASTRUCTURE**

## Вступ

При переході до мережецентричної фази еволюції цивілізаційна роль природної людської мови докорінно змінюється. Всесвітня Мережа вже перетворилася в середу, де розігрується когнітивно-комунікативний сценарій розвитку цивілізації. Економіка, заснована на знаннях, і так звана «цифрова економіка» вимагають колосальних обсягів нової науково-технічної, бізнесової, оперативної та іншої інформації, виробництво якої також включено до загального когнітивно-комунікативного процесу. В своїй найважливішій, концептуальній частині ця інформація представлена переважно структурами природної мови.

Є всі підстави вважати, що зростання інформації, що функціонує в Мережі, вже вийшло на експонентний режим і досягло колосальних обсягів, які збільшуються в постійно зростаючій прогресії. Цілковито обґрунтованими вбачаються сумніви, що такі великі обсяги інформації можуть бути ефективно опрацьовані, а головне – адекватно сприйняті й усвідомлені їхніми реципієнтами-адресатами в реальному часі сучасного буття. Адже експоненційне зростання інформації не супроводжується адекватним зростанням людських можливостей щодо її засвоєння, а тим паче ефективного використання.

Виникає головне протиріччя сучасної епохи [1]: закон еволюції вимагає зростання обсягів інформації, виробленої і сприйнятої людством, а суспільство як сума індивідів і відносин між ними, внаслідок особливостей людської природи, не в змозі належним чином скористатися цими обсягами і змушене обмежувати їх виробництво, обробку і використання. Еволюція ніби сама «вмикає» механізми свого гальмування, що іноді проявляються в досить драматичних формах. Все більшої популярності набувають катастрофічні сценарії розвитку цивілізації, гіпотези технологічної сингулярності, трансгуманістичні концепції тощо.

### 1. Статус мови в мережецентричному світі

Зазначені особливості сучасного етапу розвитку Мережі висунули проблему створення інструментів, заснованих на принципах штучного інтелекту і здатних взяти на себе значну частину функцій основного когнітивного тракту людини [2]. Таким чином проблема інтелектуалізації Мережі впевнено пересунулася на передній план актуальності, а серед безлічі аспектів інтелектуалізації особливо виділяється мова.

Справді, сьогодні вже цілком очевидно, що лінгвістичне забезпечення Мережі відіграє роль провідного чинника і основного інтерфейсу, що забезпечує взаємодію Людини з Мережею і Людини з Людиною через Мережу. Набуває все більшої актуальності проблема інтеграції ідей і технологій віртуалізації, «великих даних» та інтелектуалізації, головним чином, через механізми природної мови.

Однак особливість лінгвістичних засобів полягає в тому, що мови існують лише у формі окремих національних мов, носії яких, маючи професійну підготовку в області лінгвістичних технологій, власне, й здатні розробляти лінгвоінформаційні компоненти програмного забезпечення на належному рівні та прийнятної якості.

Основою такого роду розробок служать кодифіковані, анотовані й репрезентативні моделі та масиви лінгвістичних даних, що представляють всі (в ідеалі) аспекти функціонування тієї чи іншої мови – як в когнітивному, так і в комунікативному плані. Такими засобами служать лексикографічні середовища [3] та інтелектуальні лексикографічні агенти [4], а також лінгвістичні корпуси [5], які оперують великими цифровими масивами лінгвістично кваліфікованих і анотованих текстів, концептографічні та онтографічні системи обробки та інтелектуальної інтерпретації, різного роду перетворювачі гетерогенних лінгвістичних даних і т. ін.

У цьому зв'язку слід особливо відзначити проблему багатомовності або, як її ще називають, Вавилонський синдром. Як відомо, зараз у світі налічується понад 6000 різних мов, які дуже варіюють за своїм інформаційним та офіційним статусом. Щорічно в світі зникає кілька десятків мов, а число найбільш активно використовуваних мов (у тому числі – в Мережі) можна оцінити величиною приблизно в сто одиниць. При цьому залишається невирішеною і навіть загострюється проблема зникнення малих та міноритарних мов, що становить серйозну загрозу деградації мовного розмаїття і безповоротної втрати цілих мовних картин світу. Створення високоякісних інтерлінгвальних технологій та інструментів ефективного оперування таким складним, динамічним й недостатньо сформованим мовним середовищем наштовхується на цілий ряд труднощів, пов'язаних з проблематикою взаємовідносин між мовною, розумовою та образною підсистемами свідомості та підсвідомості, причому як на індивідуальному, так і на соціальному рівнях. На наше переконання, універсальна мова (інтерлінгва, лінгва франко ...) не може бути створена на субстраті якої-небудь одної або декількох національних мов, а повинна формуватися на основі якихось інших, поки що не дуже зрозумілих принципів.

У той же час очевидно, що в сучасному мережецентричному світі природна людська мова все більш виразно набуває рис не тільки (і навіть не стільки) гуманітарного, скільки (і перш за все) технологічного чинника. Завдяки цьому технологічний статус мови значною мірою визначатиме характер розвитку цифрової мережецентричної цивілізації в найближчий період, а разом з цим – й ієрархію мов, яка буде демонструвати здатність мови тієї чи іншої

національної або етнічної спільноти до успішної конкуренції в колі світових мов.

Варто зробити особливий акцент на високій науковості та трансдисциплінарності створення відповідних інформаційно-лінгвістичних технологій та інструментів.

## 2. Проєкт «Всесвітній Лінгвістичний Діалог»

Розв'язання цієї проблеми, на нашу думку, можливо лише в середовищі спеціального інтегрованого мультилінгвального середовища. Ми пропонуємо назвати його «Всесвітнім Лінгвістичним Діалогом», що мислиться як далекосяжне узагальнення ідеї «Всеукраїнського Лінгвістичного Діалогу», сформульованої нами ще в 2003 році [6]. «Всесвітній Лінгвістичний Діалог» ми уявляємо собі як розподілену мережеву систему соціально-професійної взаємодії в галузі лінгвістики у вигляді віртуалізованої науково-дослідницької та соціальної інфраструктури, лінгвістичних ресурсів та інструментів лінгвістичного дослідження і проектування.

Це дозволить шляхом виділення відносно невеликих фінансових коштів забезпечити піднесення на якісно новий рівень кадровий склад і фактичні результати в галузі мультилінгвальної інноваційної лінгвістичної технології, теорії і практики штучного інтелекту, їхньої практичної результативності та ефективної інтеграції загальносвітового інформаційно-лінгвістичного, наукового і культурного простору.

Виходячи з викладеного, метою даного проєкту ми вважаємо створення загальносвітової соціально-професійної Мережі «Всесвітній Лінгвістичний Діалог» для збереження мов народів світу, розвитку мовного розмаїття і мультилінгвальної взаємодії в кіберпросторі у вигляді розподіленої, відкритої, загальнодоступної й безперервно еволюціонуючої системи лінгвістичних ресурсів та лінгвістичної інфраструктури.

Таким чином, *визначальними концептами проєкту стають лінгвістичні ресурси та лінгвістична інфраструктура.*

При цьому:

1) до системи *лінгвістичних ресурсів* включаємо:

– Всесвітню словникову базу, а саме:

традиційні словники й цифрові лексикографічні системи, які надають лексикографічний опис (граматичний, семантичний, прагматичний, статистичний, етимологічний, лінгвогеографічний та ін.) мов загальносвітового лінгвістичного простору, а також відповідні лінгвістичні корпуси; цифрову систему термінології і термінографії, цифрову енциклопедичну та довідкову базу;

– засоби цифрової гуманітаристики: електронні системи розпізнавання та синтезу природних мов (фонетична і письмова форми); системи фонетико-графічних трансформацій; інтелектуальні

людинамашинні інтерфейси, засновані на принципах природної мови; інтелектуальні цифрові системи семантичної інтерпретації і концептографічного аналізу, а також засоби лінгвістичної експертизи природномовних текстів; засоби і технології конвертації (парсингу) паперової лінгвістичної та літературної спадщини до цифрової форми; засновані на корпусних технологіях системи, засоби і технології електронного навчання мовам; засоби і технології жестових мов; – дослідницькі цифрові лінгвістичні системи;

2) система *лінгвістичної інфраструктури* міститиме:

– Всесвітню лінгвістичну мережу як комплекс спеціалізованих програмно-апаратних засобів доступу і комунікації між локальними лінгвістичними центрами – суб'єктами системи Всесвітніх лінгвістичних ресурсів (ВЛР);

– головний репозиторій системи Всесвітніх лінгвістичних ресурсів;

– віртуальні системи професійної взаємодії в лінгвістиці (віртуальні лінгвістичні лабораторії, мережеві літературні та загальнокультурні енциклопедичні системи і системи спеціального призначення, в тому числі інструментальні);

– комплекс навчальних і нормативно-програмних засобів для забезпечення функціонування і мережевої взаємодії учасників і членів «Всесвітнього лінгвістичного діалогу».

## 3. Основні напрями «Всесвітнього Лінгвістичного Діалогу»

Зрозуміло, що така універсальна система загальносвітових лінгвістичних ресурсів і відповідної інфраструктури вимагає спеціального і достатньо кваліфікованого проектування. Досвід автора участі в міжнародному проєкті MONDILEX [7] і проєкті створення Національної словникової бази України [8] дозволяє зробити висновок про достатню реалістичність формування глобальних соціально-професійних лінгвістичних систем, які в силу їх відкритості надали б можливість усім мовам і всім фахівцям і аматорам не тільки активно представити свої зацікавленості і практичні напрацювання в загальносвітовому лінгвістичному процесі, а й скористатися найбільш просунутими і ефективними мовними технологіями та інструментами лінгвістичного дослідження, розробленими для найбільш розвинених у цьому відношенні світових мов. Таким чином, проблема збереження мовного розмаїття отримала б ефективний інструментарій для свого вирішення.

Серед завдань проєкту «Всесвітній Лінгвістичний Діалог» вважаємо за необхідне відзначити наступні напрями.

1. Корпусна лінгвістика. Створення лінгвістичних корпусів та корпусних технологій опрацювання текстів.

2. Комплекс віртуальних лексикографічних лабораторій для всіх мов проекту. Розробка і створення інструментальної системи, призначеної для проектування учасниками проекту власних, системно узгоджених віртуальних лексикографічних лабораторій.

3. Головний репозиторій системи Всесвітніх лінгвістичних ресурсів. Засоби адміністрування і система доступу до Головного сховища ВЛР.

4. Засоби міжмовної адаптації та інтеграції різних лінгвістичних ресурсів і систем.

5. Когнітивно-концептографічний комплекс обробки та аналізу природномовних текстів.

6. Інтегровані інструментальні платформи інтелектуальної обробки мовних даних і лінгвістичних структур.

7. Моделювання основного когнітивного тракту людини і розробка відповідних технологічних застосунків.

8. Розробка інтелектуальних лінгвістичних інтерфейсів.

9. Дослідження в галузі ДНК-лінгвістики в контексті біоінформатики і розробка відповідних застосунків.

10. Розробка засад еволюційної лінгвістики.

Зрозуміло, що всі відзначені напрямки повинні розроблятися в обсязі всіх мов - учасників проекту, а в ідеалі охоплювати всі мови народів Світу.

#### 4. Заключні зауваження

Для проектування такої глобальної системи необхідно забезпечити консолідацію зусиль і формування інтернаціонального дослідницького колективу фахівців, що має досвід відповідної роботи. З огляду на складність і масштаб завдання, вбачається доцільним і необхідним прийняття необхідних політичних рішень на міжнародному рівні. Автор, на жаль, не дуже ясно уявляє собі, хто б міг стати суб'єктом даної міжнародної ініціативи. У той же час, її зміст, як ми уявляємо, в основних рисах може бути зведений до двох положень:

– по-перше, констатація доцільності створення загальносвітової соціально-професійної мережі «Всесвітній Лінгвістичний Діалог» для збереження мов народів світу, розвитку мовного розмаїття і мультілінгвальної взаємодії в кіберпросторі у вигляді розподіленої, відкритої, загальнодоступної і безперервно еволюціонуючої системи лінгвістичних ресурсів і лінгвістичної інфраструктури.

– по-друге, організація міжнародної робочої групи фахівців для розробки концепції «Всесвітнього Лінгвістичного Діалогу» і підготовки пропозицій для урядів країн Світу, громадських і приватних організацій зі створення Міжнародного Фонду «Всесвітній Лінгвістичний Діалог».

На основі викладеного ми робимо висновок, що доля світового мовного розмаїття вирішальною мірою залежить від створення глобального мережевого лінгвістичного процесу, який був би здатний надати всім мовам світу можливість рівноправного і ефективного в ньому участі. На нашу думку, ідея «Всесвітнього Лінгвістичного Діалогу» найбільш повно відповідає цьому прагненню.

#### Список літератури:

- [1] Широков В. А. Эволюция как универсальный естественный закон (Пролегомены к будущей общей теории эволюции). Бионика интеллекта. – Часть I. 2017. № 1 (88). Сс. 3–14. ([https://www.ulif.org.ua/system/files/shirokov\\_bionica\\_2017.pdf](https://www.ulif.org.ua/system/files/shirokov_bionica_2017.pdf)) Часть II., 2017. № 2 (89), Сс. 3-18. <https://www.ulif.org.ua/system/files/bionica-2017-part2.pdf>. Часть III., 2018. – № 1 (90). – С. 3–18. <https://www.ulif.org.ua/system/files/bionica-2018-part3.pdf>
- [2] Palagin A. V., Широков V. A. Principles of cognitive lexicography // International journal «Informational theories & application». – 2000. – Vol. 9. – № 2. – P. 43–51.
- [3] В. А. Широков та ін. Лінгвістично-інформаційні студії: Праці Українського мовно-інформаційного фонду НАН України: у 5 т. Том 1. Наукова парадигма та основні мовно-інформаційні структури. Київ, Український мовно-інформаційний фонд НАН України. 2018. 271 с. ISBN 978-966-02-8683-2. ISBN 978-966-02-8684-9 (Т. 1). DOI 10.33190/978-966-02-8683-2/8684-9
- [4] В. А. Широков та ін. Лінгвістично-інформаційні студії: Праці Українського мовно-інформаційного фонду НАН України: у 5 т. Том 5. Віртуалізація лінгвістичних технологій. Київ, Український мовно-інформаційний фонд НАН України. 2018. 286 с. ISBN 978-966-02-8683-2. ISBN 978-966-02-8690-0 (Т. 5). DOI 10.33190/978-966-02-8683-2/8690-0
- [5] В. А. Широков та ін. Лінгвістично-інформаційні студії: Праці Українського мовно-інформаційного фонду НАН України: у 5 т. Том 4. Корпусна та когнітивна лінгвістика. Київ, Український мовно-інформаційний фонд НАН України. 2018. 300 с. ISBN 978-966-02-8683-2. ISBN 978-966-02-8689-4 (Т. 4). DOI 10.33190/978-966-02-8683-2/8689-4
- [6] Широков В. А. Всеукраїнський лінгвістичний діалог у контексті теорії лексикографічних систем // Мовознавство. – 2003. – № 6. – С. 3-7.
- [7] Main results of MONDILEX project. Ludmila Dimitrova, Violetta Koseska-Toszewa, Radovan Garabik, Tomaz Erjavec, Leonid Iomdin, Volodymyr Shyrokov. <https://ispan.waw.pl/journals/index.php/cs-ec/article/view/cs.2011.017> DOI: <https://doi.org/10.11649/cs.2011.017> Copyright (c) 2015 Ludmila Dimitrova, Violetta Koseska-Toszewa, Radovan Garabik, Tomaz Erjavec, Leonid Iomdin, Volodymyr Shyrokov. License URL: <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/pl/>
- [8] Указ Президента України від 07. 08. 1999 р. № 967 «Про розвиток національної словникової бази». Зокрема, в ході реалізації згаданих проектів було створено близько 50 віртуальних лексикографічних лабораторій, частина з яких експлуатується в промисловому режимі.

Надійшла до редакції 15.01.2020



**Anna Sereda**

Senior lecturer of Foreign Languages Department  
of Kharkiv National University of Radio Electronics,  
Kharkiv, Ukraine, hanna.sereda@nure.ua, ORCID iD: 0000-0002-1802-2174

## **INTERCULTURAL COMMUNICATION: LINGUISTIC AND CULTURAL BARRIERS**

Questions of achieving effectiveness of intercultural communication, its linguistic and cultural-anthropological aspects are considered. Various factors influence the success of communication: communicative intentions, goals and relationships of communicants, their social status, education, culture, level of knowledge about an object, etc. The problem of achieving successful intercultural communication is interdisciplinary. A person is considered as the owner of a special cognitive system, which is an interconnected thinking, consciousness, speech and he processes and stores information. The extraction of information from memory occurs in verbal form. Language is a cognitive-communicative system, but context, degree of awareness of interlocutors, and their background knowledge are important for communication. Linguistic and cultural barriers of intercultural communication are considered, as well as the place of machine translation in communication.

**INTERCULTURAL COMMUNICATION, COGNITIVE LINGUISTICS, ANTHROPOCENTRIC PARADIGM, MENTAL REPRESENTATIONS**

Розглянуто питання досягнення ефективності міжкультурної комунікації, її лінгвістичний і культурно-антропологічний аспекти. На успішність комунікації впливають різні фактори: комунікативні наміри, цілі і взаємини комунікантів, їх соціальні статуси, освіта, культура, рівень знань про об'єкт тощо. Проблема досягнення успішної міжкультурної комунікації є міждисциплінарною. Людина розглядається як володар особливої когнітивної системи, яка являє собою взаємопов'язані мислення, свідомість, мова і здійснює обробку та зберігання інформації. Виймання інформації з пам'яті відбувається у вербальній формі. Мова є когнітивно-комунікативною системою, але для комунікації важливий контекст, ступінь інформованості співрозмовників, наявність у них фонових знань. Розглянуто лінгвістичні і культурні бар'єри міжкультурної комунікації, а також місце машинного перекладу в комунікації.

**МІЖКУЛЬТУРНА КОМУНІКАЦІЯ, КОГНІТИВНА ЛІНГВІСТИКА, АНТРОПОЦЕНТРИЧНА ПАРАДИГМА, МЕНТАЛЬНІ РЕПРЕЗЕНТАЦІЇ**

Рассмотрены вопросы достижения эффективности межкультурной коммуникации, ее лингвистический и культурно-антропологический аспекты. На успешность коммуникации влияют различные факторы: коммуникативные намерения, цели и взаимоотношения коммуникантов, их социальные статусы, образование, культура, уровень знаний об объекте и др. Проблема достижения успешной межкультурной коммуникации является междисциплинарной. Человек рассматривается как обладатель особой когнитивной системы, которая представляет собой взаимосвязанные мышление, сознание, речь и осуществляет обработку и хранение информации. Извлечение информации из памяти происходит в вербальной форме. Язык является когнитивно-коммуникативной системой, но для коммуникации важен контекст, степень информированности собеседников, наличие у них фоновых знаний. Рассмотрены лингвистические и культурные барьеры межкультурной коммуникации, а также место машинного перевода в коммуникации.

**МЕЖКУЛЬТУРНАЯ КОМУНІКАЦІЯ, КОГНІТИВНА ЛІНГВІСТИКА, АНТРОПОЦЕНТРИЧЕСКАЯ ПАРАДИГМА, МЕНТАЛЬНІ РЕПРЕЗЕНТАЦІЇ**

The future of mankind depends largely on its ability to communicate.

*S. Ter-Minasova [1]*

### **Introduction**

Currently, globalization has embraced all spheres of human life. In conditions of post-industrial society, work with information has become one of the productive forces of society. This generated interest among representatives of different sciences in the process of interaction and mutual influence of cultures, in intercultural communication.

The actual problem of modern society become achievement of effectiveness of intercultural communication in economy, science, education, international contacts and

everyday life. In the process of intercultural interaction, a person faced with difficulties, among which the linguistic difference is not the only one. The cultural and anthropological aspect of communication is no less important than the linguistic one. Currently, problems of intercultural communication are being studied by cognitive linguistics, cognitive psychology, sociolinguistics, psycholinguistics, linguoculturology and others. Understanding problems and characteristics of intercultural communication is very important during studying foreign languages, when teaching students in a language that is not their native and it is doubly important in professional training, which is carried out in a language that is not native to both teachers and students.

## 1. Linguistic and cognitive aspects of communication

There are many definitions of communication as purposeful transmission of information, it is hardly possible to single out the most comprehensive of them, but the most capacious (including both interpersonal communication and technical means used for implementation of it), perhaps, it will be: Communication is a type of active interaction between objects of any nature, involving information exchange [2].

The authors of the first linear model of communication (Fig. 1), developed in 1949, were Claude Elwood Shannon and Warren Weaver [3, p. 7]. The goal of Shannon-Weaver's communication theory was to identify the principles of information transfer. It is accepted to attribute their work to cybernetics, which considers systems abstractly, regardless of their material nature, i.e., elements of the system can be technology, man, human society, etc.

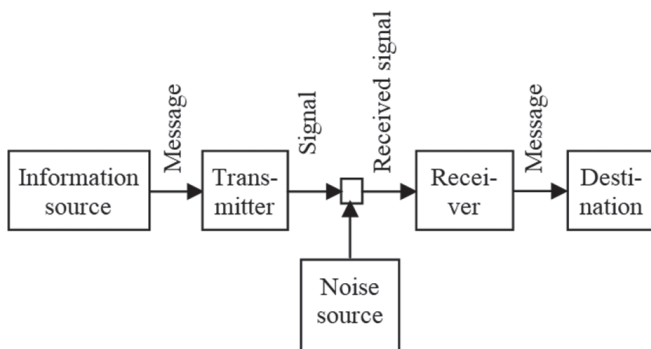


Figure 1. Shannon-Weaver model

This model describes linear message passing and includes five key elements: information source, transmitter, transmission channel, receiver, and final target. In addition, this model assumes possibility of distortion of information, i.e. includes a noise source. The authors of this communication model distinguish three types of communication problems: technical, semantic and efficiency problems.

Such model of communicative act describes the process of transmitting information using a language (language code). But for successful communication, encoding and decoding a message using a language code are not enough.

Danish linguist Otto Jespersen, who participated in the development of international artificial languages in the early twentieth century, wrote: "The essence of language is human activity – activity on the part of one individual make himself understood by another, and activity on the part of that other to understand what was in the mind of the first" [4 p. 17].

Information is transmitted from person to person through language or written form, as well as non-verbal means. For successful communication, it is necessary that communicants understand each other. This is not such a simple task as it might seem at the first glance.

According to Russian linguists E.M. Vereshchagin and V.G. Kostomarov the fact is that even knowing the same language, people can not always correctly understand each other, and the reason is often the divergence of cultures [5, p. 26].

So why do people sometimes easily understand each other, and sometimes they cannot reach mutual understanding, despite any explanations? The search for answers to this question in the second half of the 20th century led to the development of theory of communication, theory of discourse, linguoculturology, and establishment of an anthropocentric paradigm in linguistics.

It was preceded by a comparatively-historical and systemic-structural paradigm. The focus of the comparative-historical paradigm was the evolution of languages. The system-structural paradigm is based on the study of language systems. System properties are not a simple sum of its components. A sentence is not just a sum of lexical units. Lexical units have the property of nominativity, and the sentence has already had feature of communicativeness.

Anthropocentric paradigm puts the person in the center of attention. The person is began to be considered as the owner of a special cognitive system, which is an interconnected thinking, consciousness, speech, possessing and storing of information. It is also important that in the human mind there is a double coding of information in verbal and visual form. Canadian psychologist Allan Paivio associated this process with the complementarity of verbal and non-verbal communication systems [6].

Cognitology combining with cognitive linguistics, cognitive psychology and cognitive sociology are trying to answer the questions about how a person learns the world, what information about the world becomes the knowledge of a given person, how his consciousness is organized, how his world picture is formed. The object of cognitology is information, its processing, storage and transmission through communicative channels.

The processing of information is carried out by a person in acts of thinking. The received knowledge forms cognitive structures (mental spaces, frames) and is placed in memory. Human cognitive activity is associated with the classification, categorization and conceptualization of reality. Moreover, every person, depending on his or her experience and abilities, has own interpretation of the information received and mental representation. In addition, consciousness operates not only with knowledge, but also with thoughts, assessments and beliefs. So a person forms a picture of the world, which affects communication and determines his or her behavior.

Information about certain situations and experience (images, concepts) is accumulated and stored in mental spaces (frames). It is frame concepts that allow us to model understanding. But the correct understanding by communicants of each other is an indicator of the effectiveness of communication.

The extraction of information from memory is associated with its presentation in verbal form. So, there is a translation of *lingua mentalis* into a specific ethnic language. Language is a system of verbalized knowledge about the world, and verbal processing of cognitive structures and elements of experience (concepts) forms a linguistic picture of the world. The linguistic picture of the world reflects reality through the cultural picture of the world.

Language is a cognitive-communicative system. A statement may not be an accurate reflection of thought, which means it may not be understood or misunderstood by the interlocutor. Therefore, linguistics is considered to be one of the main components of cognitive science.

Human communication in general, and language communication in particular, is subject to conventions adopted in a given ethnic culture or in a given society. Language is not just a way of encoding and decoding information, but also a cultural phenomenon that is being studied by linguoculturology.

Thus, the problem of successful communication, including intercultural communication, is interdisciplinary. And anthropocentric approach helps to understand how our consciousness functions, how information is stored in it, how the person operates with these "storage units", how they appear in language, how the picture of a person's world and his activity are reflected in his speech and affect the communication process. Therefore, the anthropocentric paradigm is often called cognitive-communicative.

Communicants generate statements and interpret them in a specific communicative-pragmatic space, or context. Context combines the sense and meaning of a text and defines the meaning of language expressions in a given text. Communication is carried out in the form of isolated communicative acts. A connected sequence of communicative acts forms a discourse that combines linguistic (language, speech) and extra-linguistic factors.

Various factors influence the success of communication: communicative intentions, goals and relationships of communicants, their social status, education, culture, level of knowledge about the subject, etc. Each participant in the discourse has own set of such factors. And they rarely match. This is especially true in the case of intercultural discourse, when the language of communication is not native to one or even to both interlocutors. In the context of globalization, this language (from business negotiations to tourism) is often English.

## **2. Linguistic and cultural barriers of intercultural communication**

Successful intercultural communication is an adequate understanding of two participants in a communicative act belonging to different national cultures [5 p. 26].

The founders of intercultural communication as an academic discipline are considered to be American anthropologist Edward Twitchell Hall and linguist George Leonard Trager [7, 8].

E. Hall investigated characteristics of different cultures and their cultural and communication characteristics. He concluded that in intercultural communication, context is important for understanding. It is the context and the degree of awareness of interlocutors to determine the nature and results of communication process. He wrote: "The problem lies not in the linguistic code but in the context, which carries varying proportions of the meaning. Without context, the code is incomplete since it encompasses only part of the message" [9 p. 86]. E. Hall introduced the concepts of high-context culture and low-context culture. He distinguished these cultures by the degree of understanding of implicit information by members of a given cultural community, i.e. by degree of their awareness.

During intercultural communication it is very important to know to which of these types culture is related. In high-context cultures, a large proportion of non-verbal information is well understood in this community, but which is very difficult for a foreigner to understand. In low-context cultures, the role of non-verbal information is small, it is customary to clearly express thoughts and proceed from the fact that interlocutor does not have implicit information. Often a lack of understanding of these differences causes communication inefficiencies.

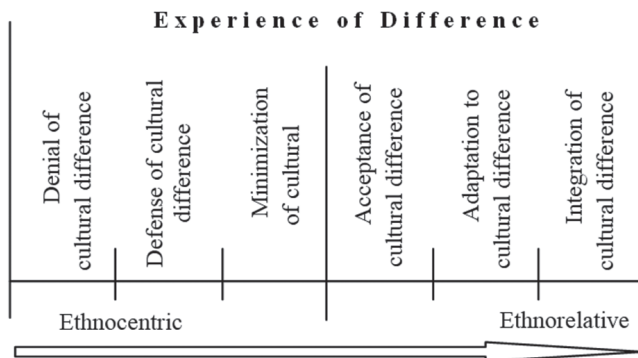
It is very important for interlocutors to understand each other is their background knowledge of subject of conversation. In 70s of 20th century, an American educator and culturologist Eric Donald Hirsch paid attention to the fact that students understand the text (even written in their native language) if they have basic knowledge of what the text says. He came to the conclusion that literacy (knowledge of letters and numbers) is enough to read the text, and for understanding you have to have background knowledge, "cultural literacy", i.e. knowledge of culture, history, religions, etc. He developed the theory of linguo-cultural literacy [10]. According to this theory, the availability of knowledge that forms the cultural minimum of awareness of relevant culture is necessary for successful flow of communication. To understand the meaning of texts and discourse, participants in communication need to understand not only linguistic meanings, but also value attitudes, psychological and social characteristics, as well as non-verbal means of communication of this culture.

E. Hirsch published a dictionary of cultural literacy, which, on his opinion, allows you to penetrate into the culture of native speakers, in their background knowledge. Unlike specialized knowledge, cultural literacy means knowledge understandable by all. In the dictionary, E. Hirsch contributed more than 5 thousand words that exist in modern American society. This dictionary is a kind of encyclopedia for schoolchildren and students in the United States. The knowledge given in it will help communicants, who communicate in their native English language better understand each other. But E. Hirsch also notes that due to cultural literacy, perception and

understanding of explicit and implicit information, the context and meaning of intercultural communication are possible: “True literacy has always opened doors — not just to deep knowledge and economic success, but also to other people and other cultures” [11, 12].

For a modern person, intercultural competence is very important, i.e. ability to communicate successfully with representatives of other cultures.

American sociologist Milton J. Bennett developed Basic Concepts of Intercultural Communication: Paradigms, Principles, & Practices [13]. He created Developmental Model of Intercultural Sensitivity (DMIS) [14]. M. J. Bennett considers that lack of understanding and rejection of cultural differences are causes of difficulties in intercultural communication. And to adapt to a foreign culture, people need to recognize these differences. A person must preserve his cultural identity and at the same time engage in a foreign culture. DMIS reflects this process (Fig. 2).



**Figure 2. Developmental Model of Intercultural Sensitivity (DMIS) by Milton J. Bennett.**

Milton J. Bennett founded and directed Intercultural Development Research Institute co-located in Milano, Italy and Washington State, USA (IDR Institute URL: <http://www.idrinstitute.org>)

People think very often that learning a foreign language can solve their problems with intercultural communication. Then they come to the country which language they have studied, and understand that their knowledge is not enough to understand the interlocutor and be able to express their own thoughts so that the interlocutor understands them. This is due to the fact that there are linguistic and cultural barriers. Russian linguist Svetlana Ter-Minasova gives the following classification of these barriers [15].

1. Obvious language difficulties:

- difference in the grammatical structure of the language;
- difference in phonetics and spelling, the gap between pronunciation and spelling.

2. Hidden language difficulties:

- volume of semantics, i.e. words of different languages, denoting the same concept, can differ in semantic (conceptual) capacity;

- stylistic connotations, i.e. additional semantic or stylistic meanings, or an expression of the relation (positive or negative) in the statement;

- lexical and phraseological compatibility, the ability of words to be easily combined with some words and not to be combined with others (especially important if you need to express an idea in a foreign language);

- “false friends of the translator”, i.e. words that look deceptively familiar but have a different meaning or connotation.

3. Obvious cultural and linguistic difficulties, which include culture-specific vocabulary designating objects and phenomena that are characteristic only to a given linguistic community, proverbs, sayings, phraseological units, popular expressions and precedent phenomena.

4. Hidden socio-cultural and linguistic difficulties:

- deceptive equivalence, caused by the fact that words can be equivalent, but they are accompanied by various language pictures of the world, worldview, lifestyle, etc.;

- sociocultural connotations, i.e. additional “shades” of words, which are conditioned by characteristics of the culture;

- sociocultural conditionality of verbal communication, especially verbal communicative behavior, that is, features of using language units in real speech (usage) in various situations (for example, dates, time, units, numerals, speech strategies, greeting, farewell, etc.).

- sociocultural connotations of proper names (anthroponyms and toponyms) that are part of linguistic picture of the world and their ignorance or incorrect pronunciation can lead to communication failure.

In addition to verbal communication, non-verbal means, such as facial expressions, gestures, appearance, and others, are an important components of intercultural communication. Therefore, acquaintance with a foreign culture involves study of characteristics of non-verbal component of intercultural communication. After all, even “wrong.” from the point of view of a foreign culture, clothing can affect the effectiveness of communication.

Thus, for success of intercultural communication, it is necessary not only to learn a foreign language, but also to get acquainted with a foreign culture and a foreign, unusual picture of the world. Only then successful communication will be possible. And the stronger the differences between languages and cultures, the more difficult it is to master a foreign language as a means of intercultural communication and adapt to features of culture.

So, for the success of intercultural communication, language competence is not enough, intercultural competence and communicative competence are also necessary.

**3. Intercultural communication and machine translation**

Among the students studying foreign language, two categories can be distinguished: those who are serious about learning the language, because they believe that success in their future professional activities is associated

with this, and those who believe that, if necessary, communication with foreigners will be saved by the popular now machine translation.

The ideas of machine translation originated in the middle of the 20th century and were associated with the appearance of computer technology. To use computers for machine translation was proposed by one of the authors of the first communication model Warren Weaver in 1949. At the same time, mathematical linguistics appeared, which developed abstract descriptions of the natural language.

In the USA, and a little later in other countries, they began to develop programs for machine translation, which were based on the use of bilingual dictionaries and word placement rules in a sentence. In 1954, a machine translation system from Russian into English was tested. Many were confident that Fully Automated High Quality Translation of Unrestricted Text (FAHQT) will be possible soon. But the task was not so simple.

A new wave of interest in machine translation arose at the end of the 20th century with the appearance of personal computers. The rapid development of computer networks, uniting the whole world, begins. The increase in demand for quick translation systems was caused by the beginning of globalization and increased interest in scientific, technical, commercial and other texts.

At present, it is customary to distinguish machine translation (MT) and machine-aided or machine-assisted translation (MAT) with the participation of a person, but if you need to indicate both, write M(A)T.

The main difficulty of machine translation systems is that natural languages are difficult to formalize. Currently, natural language processing is a common area of artificial intelligence and mathematical linguistics. The goal of natural language processing is to analyze the source language and synthesize the text in the target language.

There are several technologies in machine translation that reflect evolutionary stages of machine translation.

1. Rule-Based Machine Translation (RBMT) allows you not only translate words, but also grammatical structures of source language converting into the target language. There are two RBMT technologies: Interlingua and Transfer. Both technologies create an intermediate semantic text model of source language. But in Interlingua technology this model is common for several target languages, and in Transfer technology a model is created for each language pair.

2. Statistical Machine Translation (SMT) is based on a comparison of large volumes (cases) of pairs of texts in different languages and consists in constructing statistical correlations between source texts and translations. There are also hybrid machine translation systems that use both language rules and statistical algorithms.

3. Example-Based Machine Translation (EBMT) is based on finding an analogy among a large body of pairs of examples in two languages.

4. Neural Machine Translation (NMT) is the newest direction in the development of machine translation using artificial intelligence. NMT uses neural networks that simulate the activity of human brain and are statistical models of learning. These systems are constantly "trained". Today it is the best machine translation system that translates whole sentences and phrases.

Machine translation is very convenient for primary work with texts. For example, machine translation will help the reader get a general idea of the topic and content of the text. The result of machine translation can be used as a draft translation, which will be further edited by the translator. But with intercultural communication, machine translation can only help in the simplest versions of intercultural communication. Now you can often see people who are trying to communicate in a store, hotel or airport using machine translation according to the scheme: I typed in text on a gadget, made a machine translation of this text and showed it to my interlocutor. But even in such simple cases, repeated precise definitions to details is often follows.

Thus, machine translation, in spite of all its successes, cannot yet solve the problems of intercultural communication. The dream of a Fully Automated High Quality Translation of Unrestricted Text (FAHQT) has not come true yet. As E. Hall wrote: "In the fifties, the United States Government spent millions of dollars developing systems for machine translation of Russian and other languages. After years of effort on the part of some of the most talented linguists in the country, it was finally concluded that the only reliable, and ultimately the fastest, translator is a human being deeply conversant not only with the language but with the subject as well" [9 p. 86].

But this does not mean that machine translation will not be improved. The problems of studying the processes of thinking, formation of mental (including verbal) representations of knowledge and their extraction from memory are key for specialists in the field of cognitive psychology, cognitive linguistics and artificial intelligence [15]. Thinking processes occur in the human brain, consisting of billions of neurons connected by synapses. That is, the task of modeling mental representations is interdisciplinary, very complex. Artificial intelligence system developers have already understand that communication is not the only function of the language. The main function of language is to provide thinking.

Therefore, the principles of organizing a living human language should be laid in artificial intelligence algorithms. The mental lexicon is considered as an integrated construct, which includes not only vocabulary, grammar, syntax, semantics, but also mental phenomena such as memory, attention, thinking, etc. For this purpose, models of mental representations are developed [17, 18]. which in the future will improve machine translation.

### Conclusions

Communicative competence of intercultural communication is determined by many factors due to overcoming linguistic and cultural barriers. Effective intercultural communication requires not only knowledge of the language, but also an understanding of characteristics of thinking, verbal communicative behavior, linguistic picture of the world, culture, and value orientations of members of a given speech collective. Background knowledge on the topic of conversation is also very important. Thus, for the success of intercultural communication, linguistic, intercultural and communicative competencies are required.

The practical significance of study of communication in the light of linguistic-cognitive paradigm is to help people better understand each other when communicating, because problems of mutual understanding often arise even for people belonging to the same language culture and one social group, and in intercultural communication, problems of understanding are much harder and more relevant.

During communication, its participants jointly form senses and meanings of statements. Meaning-constructs arise as a result of a sequence of mutual changes in the competencies of communicants, taking into account the situation and context. Moreover, their discursive activity is socially and culturally determined and reflects the national picture of the world with the forms of language.

The appearance of intercultural communication as an academic discipline was caused by practical reasons. Its founders E. Hall and G. Trager in the 50s of the twentieth century worked at the Foreign Service Institute of the Department of State, helping to train diplomats prior to their departure abroad.

In the modern conditions of globalization and informatization, not only diplomats, but specialists of various professions should be able to work in a multilingual world in the conditions of intercultural contacts at different levels. Communicative competence is necessary for them to integrate into the professional environment. This puts new challenges in the training of specialists. It is the linguistic-cognitive and linguistic-cultural approach to teaching a foreign language that allows you to take into account the national-cultural specifics of language and communication and to develop interest in a foreign culture, mentality, picture of the world and all, that forms communicative competence.

An even more complex area of intercultural communication is communication in a language that is not native to the communicants, for example, in a conversation between a Chinese and a Ukrainian, the communication language may be English. Such a communicative situation requires overcoming a much larger number of cultural and linguistic barriers. Situations of intercultural communication in the “third” language are very common in the modern world and deserve a separate study.

### References

- [1] *Ter-Minasova S.* War and peace of languages and cultures? // *Intercultural Communication Studies* XVII: 2 2008. – P. 52–60.
- [2] *Азаренко С. А., Рузавин Г. И., Флиер А. Я., Бернштейн В. С., Александров А. В.* Коммуникация / Общая редакция Центра гуманитарных технологий. Отв. редактор А. В. Агеев. // Гуманитарный портал ISSN -2310-1742 [Электронный ресурс] // Центр гуманитарных технологий, последняя редакция: 08.02.2020. URL: <https://gtmarket.ru/concepts/7132>
- [3] *Shannon Claude E. & Weaver Warren.* The mathematical theory of communication. Urbana: The University of Illinois Press, 1964 (Copyright 1949 by the Board of Trustees of the University of Illinois.). – 125 p.
- [4] *Jespersen Otto.* The philosophy of grammar. London: George Allen & Unwin LTD. First Published in 1924. – 334 p.
- [5] *Верещагин Е. М., Костомаров В. Г.* Язык и культура: Лингвострановедение в преподавании русского языка как иностранного. – М: 1990. – 246 с.
- [6] *Paivio A.* Mental representations. A dual coding approach. Oxford (Mass.): Oxford University Press, 1986.
- [7] *Rogers Everett M, Hart William B., Miike Yoshitaka.* Edward T. Hall and the history of intercultural communication: The United States and Japan // *Keio Communication Review* No. 24, 2002. – P. 3–26.
- [8] *Leeds-Hurwitz Wendy.* Notes in the history of intercultural communication: The Foreign Service institute and the mandate for intercultural training // *Quarterly Journal of Speech* 76 (3), 1990. – P. 262 – 281.
- [9] *Hall E.T.* Beyond culture. – New York: Anchor Books, Doubleday, 1989 (Beyond culture was originally published in hardcover by Anchor Books/Doubleday in 1976). – 298 p.
- [10] *Hirsch E.D.* Cultural literacy: what every American needs to know. Published 1988 by Vintage (first published 1987). – 272 p.
- [11] *Hirsch E. D.* A first dictionary of cultural literacy. – Boston : Houghton Mifflin, 1989.
- [12] *Hirsch E.D. Jr., Kett J. F., Trefil J.* The new dictionary of cultural literacy : What every American needs to know. – Boston – New York : Houghton Mifflin, 2002. – 647 p. – P. xvi (The theory behind the dictionary: cultural literacy and education).
- [13] *Bennett Milton J.* Basic concepts of intercultural communication: paradigms, principles, and practices. Published by John Murray Press, United States, 2013.
- [14] *Bennett, M. J.* Towards ethno-relativism: a developmental model of intercultural sensitivity. // In R. M. Paige (Ed.), *Education for the intercultural experience.* – Yarmouth, ME: Intercultural Press, 1993. – P. 21 – 71.
- [15] *Тер-Минасова С.Г.* «Война и мир языков и культур». – М.: Слово/Slovo, 2008. – 344 с.
- [16] *Кубрякова Е.С., Демьянков В.З.* К проблеме ментальных репрезентаций // *Вопросы когнитивной лингвистики.* – №4(013). – 2007. – С, 8 – 16.
- [17] *Арутюнян В. Г.* Структура ментальных репрезентаций: извлечение текста из памяти, нейронная сеть и искусственный интеллект // *вестник пермского университета. Российская и зарубежная филология*, 2013. – Вып. 4(24). С. 133 – 139.
- [18] *Арутюнян В. Г.* «Живое» слово в структуре ментального лексикона: теоретические проблемы и методы их решения. // *Вестник РУДН, серия Теория языка. Семиотика. Семантика*, 2015, № 3. – С. 39 – 44.

*The article was delivered to editorial staff on the 03.02.2020*



С.Г. Удовенко<sup>1</sup>, Л.Е. Чала<sup>2</sup>, О.Є. Гриньова<sup>3</sup>, Т.С. Яричкіна<sup>4</sup>

<sup>1</sup> доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформатики та обчислювальної техніки ХНЕУ ім. С. Кузнеця,

м. Харків, Україна, serhiy.udovenko@hneu.net, ORCID iD: 0000-0001-5945-8647

<sup>2</sup> кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри штучного інтелекту ХНУРЕ,

м. Харків, Україна, larysa.chala@nure.ua, ORCID iD: 0000-0002-9890-4790

<sup>3</sup> старший викладач кафедри штучного інтелекту ХНУРЕ,

м. Харків, Україна, olena.hrynova@nure.ua, ORCID iD: 0000-0002-3367-8067

<sup>4</sup> студентка кафедри штучного інтелекту ХНУРЕ,

м. Харків, Україна, tetiana.yarychkina@nure.ua, ORCID iD: 0000-0003-2841-630X

## ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ ЛАНДШАФТНИХ ДІЛЯНОК З ВИКОРИСТАННЯМ РЕГУЛЯРИЗОВАНИХ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Розглядається задача розпізнавання та аналізу картографічних зображень ландшафтних об'єктів з метою локалізації районів забруднення, моніторингу змін контурів окремих ділянок зображень під впливом природних і антропогенних факторів. Пропонується архітектура глибокої нейронної мережі, що використовує техніку регуляризації штучних нейронних мереж для запобігання її перенавчання. Наводяться результати побудови, навчання та застосування згорткової нейронної мережі з процедурою виключення Dropout для завдань екологічного ландшафтного моніторингу. Визначено перспективи використання запропонованого підходу для розпізнавання зображень проблемних ландшафтних ділянок.

ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ, РОЗПІЗНАВАННЯ ЛАНДШАФТНИХ ЗОБРАЖЕНЬ, ЗГОРТКОВА НЕЙРОННА МЕРЕЖА, МЕТОД ВИКЛЮЧЕННЯ

Рассматривается задача распознавания и анализа картографических изображений ландшафтных объектов с целью локализации районов загрязнения, мониторинга изменений контуров отдельных участков изображений под влиянием природных и антропогенных факторов. Предлагается архитектура глубокой нейронной сети, использующей технику регуляризации искусственных нейронных сетей для предотвращения ее переобучения. Приводятся результаты построения, обучения и применения сверточного нейронной сети с процедурой исключения Dropout для задач экологического ландшафтного мониторинга. Определены перспективы использования предложенного подхода для распознавания изображений проблемных ландшафтных участков.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ, РАСПОЗНАВАНИЕ ЛАНДШАФТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, СВЕРТОЧНАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ, МЕТОД ИСКЛЮЧЕНИЯ

The problem of recognition and analysis of landscape objects cartographic images for localization of pollution areas, monitoring of changes of images contours under the influence of natural and anthropogenic factors is considered. The architecture of a deep neural network is proposed that uses the technique of regularization of artificial neural networks to prevent its overfitting. The results of the construction, training and application of a convolutional neural network with the Dropout elimination procedure for problems of ecological landscape monitoring are presented. The prospects of using the proposed approach for image recognition of problematic landscape areas are determined.

ECOLOGICAL MONITORING, LANDSCAPE IMAGE RECOGNITION, CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK, EXCLUSION METHOD

### Вступ

Останнім часом отримали розповсюдження цифрові технології екологічного моніторингу навколишнього середовища і природних ресурсів, що здійснюється за допомогою систем спостережень і подальшої обробки отриманих даних. Комп'ютерна обробка реалістичних картографічних зображень ландшафтних об'єктів в геоінформаційних системах (ГІС) екологічного моніторингу передбачає в загальному випадку реалізацію етапів попередньої цифрової обробки, розпізнавання та інтерпретації, як відзначається в роботах [1, 2]. Особливу практичну спрямованість мають завдання розпізнавання об'єктів за супутниковими знімками. До суттєвих труднощів такого розпізнавання слід віднести наявність різних внутрішніх та зовнішніх чинників (освітлення, орієнтація,

стан, наявність захмарених ділянок) що призводять до спотворення фрагментів зображення. Аналіз і подальша інтерпретація знімків є важливою частиною реалізації багатьох ГІС додатків (наприклад, локалізації районів забруднення, моніторинг зміни контурів окремих ділянок зображень під впливом природних і антропогенних факторів). Завданням обробки просторових даних в ГІС екологічного моніторингу природних ресурсів (зокрема, ландшафтних об'єктів) може бути поліпшення (відновлення) зображення за деяким критерієм, так і спеціальне перетворення зображень. Оброблювані зображення, як правило, спотворені шумами та викривленнями різної природи. Функціями пониження шумів в задачах обробки просторових даних в ГІС можуть бути як поліпшення візуального сприйняття аналізованих зображень, так і

збільшення чіткості при виділенні контурів об'єктів, що є необхідним для їх подальшого розпізнавання.

До найбільш актуальних завдань екологічного моніторингу навколишнього середовища і природних ресурсів за результатами супутникових спостережень слід, зокрема, віднести відстеження зміни ландшафту внаслідок планової або незаконної вирубки лісів та видобутку бурштину. В роботі [3] відзначається, що через надмірну вирубку лісів страждають не тільки самі дерева, але і інші рослини, що знаходяться на землі, тварини, для яких ця частина лісу була домом, а згодом і люди, так як через великі вирубки відбувається порушення рівня підземних вод, через що частішають випадки повеней. Однак навіть ліс, вирубаний незаконно, має шанс на відновлення, чого не можна сказати про ділянки, де після вирубки лісів несанкціоновано видобувається бурштин. Для отримання цього цінного ресурсу потрібно не тільки вирубати ліс, але також використовувати мотопомпи для підйому бурштину на поверхню, що призводить до вимивання ґрунту та заболочування навколишньої місцевості [4]. Таким чином, актуальним є запобігання несанкціонованих дій з вирубки лісів та видобутку бурштину, а також визначення тих місць, де видобуток відбувається вже тривалий час. Ефективними засобами здійснення такого запобігання можуть бути класифікація та розпізнавання зображень проблемних ландшафтних ділянок в ГІС екологічного моніторингу з використанням сучасних штучних нейронних мереж (ШНМ) [5], зокрема автоенкодерів [6].

У даній роботі пропонується архітектура глибокої нейронної мережі, що використовує техніку регуляризації загорткової ШНМ для запобігання її перенавчання, а також наводяться результати побудови, навчання та застосування такої мережі для завдань екологічного ландшафтного моніторингу.

### 1. Принципи регуляризації штучних нейронних мереж

Для розпізнавання зображень, отриманих за результатами супутникових спостережень, набули поширення технології, що використовують згорткові нейронні мережі (ЗНМ) – клас глибоких нейронних мереж (ГНМ) прямого поширення [7]. ЗНМ побудовані на використанні одного із різновидів багатшарових перцептронів, що мінімізують обсяг попередньої обробки вхідної інформації. Навчання ЗНМ відноситься до типу задач навчання «з учителем», де система навчається розпізнавати образи за допомогою різного роду адаптивних схем. Розпізнавання за такими схемами характеризується тим, що заздалегідь відома правильна класифікація кожного навчаючого образу. Базова архітектура ЗНМ полягає в послідовному використанні згорткових шарів, субдискретизуючих шарів і наявності повнозв'язних шарів на виході. При цьому застосовуються наступні парадигми: локальне сприйняття, розподілені ваги і субдискретизація. Локальне сприйняття полягає в тому, що на вхід одного нейрона подається не все

зображення, а лише деяка його частина. Концепція розподілених ваг припускає, що для великої кількості зв'язків використовується суттєво обмежений набір ваг. Субдискретизація полягає в зменшенні просторової розмірності зображення. Чергування шарів дозволяє складати карти таким чином, щоб на практиці забезпечити здатність розпізнавання складних ієрархій ознак.

Швидкість навчання і кількість нейронів у шарах ЗНМ визначаються зазвичай емпірично або з використанням апріорних даних щодо відомих протестованих мереж з аналогічною архітектурою. Швидкість навчання не є постійною величиною, а лінійно зменшується зі збільшенням числа ітерацій, впливаючи на швидкість зменшення величини корекції ваг. Визначення кількості нейронів у шарі є важливим етапом в застосуванні ЗНМ. На сьогодні не існує універсальних рекомендацій до вибору кількості прихованих шарів та кількості нейронів в них. Очевидно, що їх мала кількість не дозволяє мережі ефективно навчатися, а їх завелика кількість суттєво збільшує час навчання мережі або призводить до перенавчання мережі [8]. Перенавчання (англ. *overfitting*) мережі є однією з головних проблем використання ЗНМ [9] та полягає у тому, що створена модель починає ідентифікувати тільки приклади з навчальної вибірки, адаптуючись до них, але не вчиться класифікувати приклади, які не брали участі в навчанні. Це призводить до втрати мережею здатності узагальнення можливих класифікаційних ситуацій.

Для запобігання перенавчанню в ЗНМ використовують емпіричні та явні методи регуляризації, пов'язані насамперед зі введенням в мережу додаткової інформації. Найбільш поширеним емпіричним методом регуляризації є метод виключення (англ. *dropout*) [10]. Згідно з цим методом на кожному кроці тренування окремі вузли виключаються з мережі з імовірністю  $(1-p)$ , після чого залишається зменшена мережа, а вхідні та вихідні ребра виключених вузлів також усуваються. На наступному етапі на навчальних даних тренується лише зменшена мережа, після чого усунені вузли повторно вставляються до мережі з їхніми первинними вагами (рис. 1).

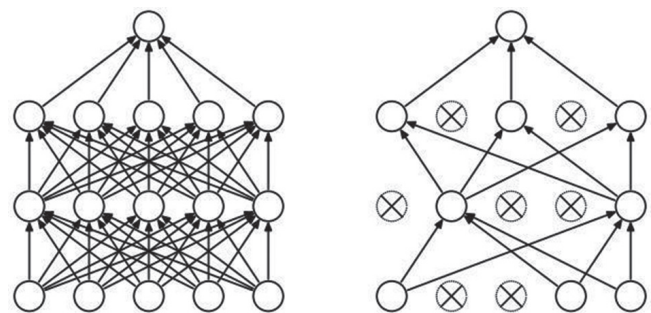


Рис. 1. Ілюстрація до процедури виключення за методом *Dropout*

Таким чином, ймовірність того, що після застосування процедури виключення нейрон залишиться в мережі, дорівнює  $q = 1 - p$ .

На етапах тренування ймовірність того, що прихований вузол буде виключено, зазвичай дорівнює 0.5, але для вхідних вузлів вона має бути набагато нижчою, адже при ігноруванні вхідних вузлів відбувається безпосередня втрата інформації.

Під час перевірки після завершення тренування в ідеалі бажано би знайти вибіркове середнє всіх можливих  $2^n$  мереж із виключеннями; на жаль, для великих значень  $n$  це є практично нездійсненним. Тим не менше, можна знайти задовільне наближення, використовуючи повну мережу, в якій виходи вузлів зважуються на коефіцієнт  $p$ , після чого математичне очікування значення виходу будь-якого вузла буде таким, як і на етапах тренування. Це є важливою перевагою методу виключення: хоча він породжує  $2^n$  нейронних мереж, але уможливорює поєднання моделей, а під час кожної перевірки розглядати необхідно лише одну мережу.

Таким чином метод виключення (dropout) дозволяє уникати необхідності тренування всіх вузлів на всіх тренувальних даних, що знижує прояв ефекту перенавчання. Цей метод також значно покращує швидкість тренування та дозволяє здійснювати практичне поєднання моделей навіть для згорткових нейронних мереж. Відзначимо, що процедура виключення послаблює взаємодії між вузлами та обмежує навчання урахуванням найбільш надійних ознак, що краще узагальнюється на нові класифікаційні дані. Це дозволяє замість навчання однієї згорткової нейронної мережі навчити набір з декількох мереж, після чого усереднити отримані результати. Нейрони, які були видалені, не впливають на процес навчання ні на одному з етапів алгоритму зворотного поширення помилки, через що виключення хоча б одного з нейронів рівносильно навчанню нової нейронної мережі. Якщо ймовірність виключення кожного нейрона однакова, то функція активації  $a(h)$  залежить від лінійної проекції вхідного  $d_i$  — вимірного вектора  $x$  на  $d_h$  — вимірний простір вихідних значень, тобто від аргументу наступного вигляду:

$$h(x) = xW + b, \quad (1)$$

де  $W$  — вектор ваг;  $b$  — настроюваний коефіцієнт.

Застосування техніки Dropout до даної проекції на етапі навчання можна представити як змінену функцію активації  $a(h)$ :

$$f(h) = D \odot a(h), \quad (2)$$

де  $D = (X_1, \dots, X_{d_h}) - d_h$  — мірний вектор випадкових величин  $X_i$ , що (згідно з законом Бернуллі) має наступний розподіл ймовірностей:

$$f(k; p) = \begin{cases} p, & \text{if } k = 1 \\ 1 - p, & \text{if } k = 0 \end{cases} \quad (3)$$

де  $k$  — можливі вихідні значення.

Відзначимо, що дана випадкова величина відповідає процедурі Dropout, яка застосовується до одного

нейрона. При цьому нейрон відключають з ймовірністю  $p = P(k=1)$ , а в зворотному випадку залишають включеним. Застосування Dropout до конкретного  $i$ -го нейрона можна представити таким чином:

$$O_i = X_i a \left( \sum_{k=1}^{d_i} w_k x_k + b \right) = \begin{cases} a \left( \sum_{k=1}^{d_i} w_k x_k + b \right), & \text{if } X_i = 1 \\ 0, & \text{if } X_i = 0 \end{cases} \quad (4)$$

де  $P(X_i = 0) = p$ .

З урахуванням того, що на етапі навчання нейрон залишається включеним в мережу з ймовірністю  $q$ , то на етапі тестування потрібно відтворити поведінку набору ЗНМ, який використовувався на попередньому етапі [9]. Для цього метод Dropout передбачає на етапі тестування множення функції активації на коефіцієнт  $q$ , тоді процедури навчання та тестування можна відповідно представити таким чином:

$$O_i = X_i a \left( \sum_{k=1}^{d_i} w_k x_k + b \right); \quad (5)$$

$$O_i = qa \left( \sum_{k=1}^{d_i} w_k x_k + b \right). \quad (6)$$

Узагальненням методу виключення є виключення з'єднань (англ. DropConnect), де кожне з'єднання, а не кожен вузол виходу, може бути виключено з ймовірністю  $1 - p$ . При цьому кожен вузол отримує вхід з випадкової підмножини вузлів попереднього шару. Виключення з'єднань є подібним до звичайного виключення тим, що воно вводить до моделі динамічну розрідженість, але відрізняється тим, що ймовірність визначається на вагах, а не на векторах виходу шару. Іншими словами, повноз'єднаний шар з виключенням з'єднань стає розріджено з'єднаним шаром, у якому з'єднання обираються випадково під час етапу тренування.

До явних методів регуляризації ШНМ відносять:

- запобігання перенавчанню шляхом обмеження кількості параметрів (зазвичай кількості прихованих вузлів у кожному шарі, або глибини мережі). Для ЗНМ на кількість параметрів впливає й розмір фільтру. Обмежування кількості параметрів безпосередньо обмежує передбачувальну потужність мережі, знижуючи складність функції, яку вона може виконувати на даних, і відтак обмежує розмір перенавчання;

- ослаблення ваг (англ. weight decay) шляхом додавання до похибки кожного вузла додаткової похибки, що пропорційна сумі ваг (норма L1) або квадратів величини (норма L2) вектора ваг. Рівень прийнятної складності моделі може бути знижено збільшенням

сталої пропорційності, що збільшує штраф за великі вектори ваг. L2-регуляризація (англ. L2 regularization) є найпоширенішим засобом явної регуляризації, що реалізується штрафуванням квадратного ступеня всіх параметрів безпосередньо в цілі. L2-регуляризація здійснює суттєве штрафування пікових вагових векторів та віддає перевагу розсіяним ваговим векторам. У зв'язку з багатократними взаємодіями між вагами та входами це реалізує властивість заохочення мережі використовувати всі її входи замість вибіркового використання лише деяких із них. L1-регуляризація (англ. L1 regularization) є іншим поширеним видом регуляризації, що веде вагові вектори до набуття розрідженості протягом оптимізації. Іншими словами, нейрони з L1-регуляризацією наприкінці процедури використовують лише розріджену підмножину їхніх найважливіших входів і стають практично інваріантними відносно зашумлених входів. Можливо також поєднувати L1 та L2-регуляризації, що відповідає варіанту еластично-сіткової регуляризації (англ. elastic net regularization);

– обмеження абсолютної вхньої межі величини вагового вектору для кожного нейрона і застосування методу проєкційного найшвидшого спуску для забезпечення цього обмеження. На практиці це відповідає попередньому уточненню параметрів з наступним забезпеченням обмеження для вагового вектору кожного нейрона [11].

Попередній аналіз свідчить про доцільність використання для моніторингу зображень ландшафтних ділянок, зокрема ділянок, де відбуваються незаконні дії з вирубки лісів та видобутку бурштину, ЗНМ з процедурою виключення Dropout (далі ця мережа позначається як ЗНМ-Д).

## 2. Побудова та програмна реалізація ЗНМ-Д для завдань екологічного моніторингу

Дані для такого завдання, як навчання нейронної мережі є вибіркою з досить великої кількості зображень. Це може складати кілька сотень тисяч зображень всього для одного з класів, щоб дозволити НМ формувати достатньо точні прогнози на даних, які не входять до навчальної вибірки.

Для деяких завдань задовільну вибірку можна знайти в інтернеті, де вона буде міститися в архіві і мати належний вигляд, проте це стосується далеко не всіх випадків, що відповідають реальним ситуаціям ландшафтного екологічного моніторингу. Зокрема, вибірки з зображеннями супутникових знімків, які б відображували вирубку лісу, а також стан територій, на яких відбувається або відбувався видобуток бурштину в інтернеті відсутні, тому для реалізації проекту побудови та тестування ЗНМ-Д з'явилася необхідність застосування існуючих сучасних додатків попередньої обробки супутникових зображень. Для створення відповідних наборів зображень в роботі

використовувався додаток «Google Earth Pro» (GEP). Особливість його використання полягає в тому, що будь-яку ділянку земної кулі можна побачити з супутника не тільки в останній момент, коли він був над цим місцем, але також в усі попередні рази, коли супутник передавав дані про конкретні території в додаток (рис. 2).

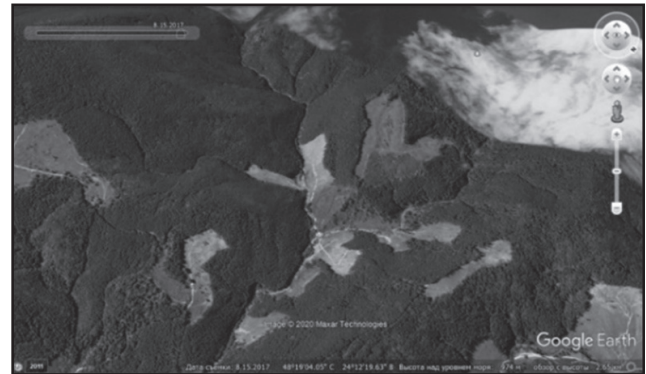


Рис. 2. Приклад зображення з ділянками вирубки лісу, отриманого з використанням «GEP»

Це є важливим для того, щоб використовувати знімки містили в собі, наприклад, саме результати вирубки лісу, а не будь-які інші роботи, через які відбулося знищення дерев. Зображення, отримані за допомогою додатку GEP, містять у верхньому лівому кутку часову шкалу, яка показує дату, коли був зроблений знімок поверхні, зображений на екрані. Аналіз таких зображень дозволяє відстежувати динаміку зміни стану лісових ділянок за будь-який відрізок часу, а послідовний набір цих зображень створює навчальну вибірку для використовуваної нейронної мережі. Результати досліджень, де наводяться дані щодо районів несанкціонованого видобутку бурштину, дозволили з використанням додатку GEP сформувати відповідну вибірку ландшафтних зображень. Приклад такого зображення (для одного з районів Рівненської області) наведено на рис. 3.

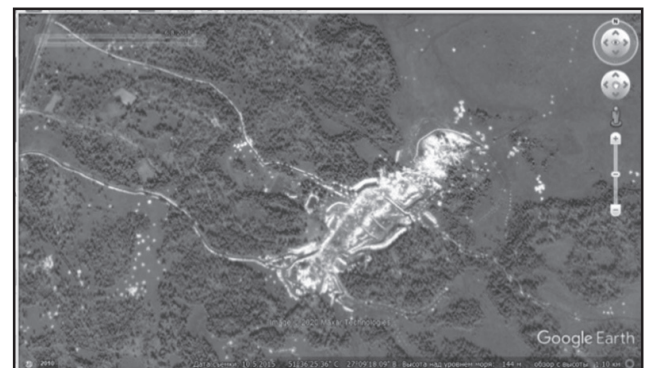


Рис. 3. Приклад зображення з ділянками несанкціонованого видобутку бурштину, отриманого з використанням «GEP»

Зображення ділянок, що передбачається аналізувати в системі екологічного ландшафтного моніторингу, можна віднести до таких чотирьох основних класів:

- клас 1: несанкціонована вирубка лісу;
- клас 2: несанкціонований видобуток бурштину;
- клас 3: хмари (захмареність зображень);
- клас 4: нормальний стан лісу (без вирубок).

Приклади зображень, що належать до класів 1 та 2 наведено вище на рис.2 та рис.3 відповідно.

На рис. 4 та рис. 5 представлено приклади зображень, що належать до класів 3 та 4.

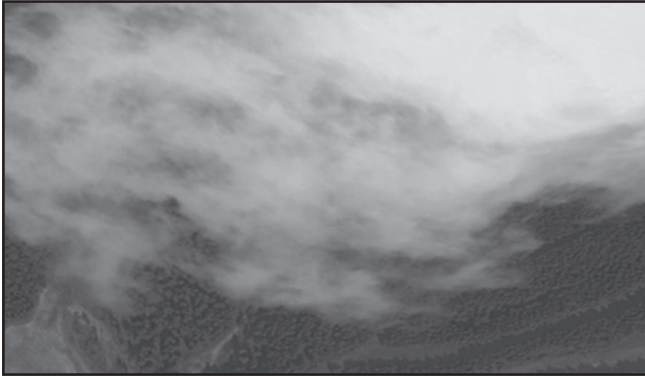


Рис. 4. Приклад захмареного зображення, отриманого з використанням «ГЕР»

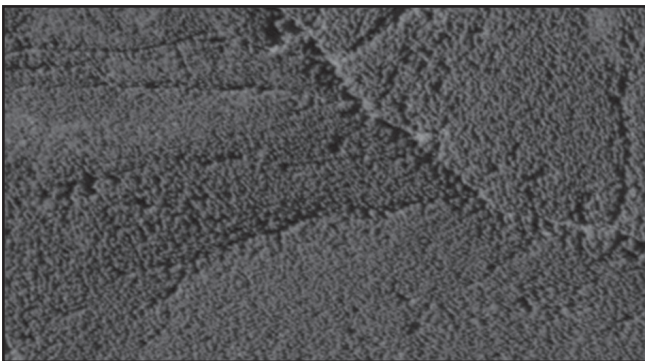


Рис. 5. Приклад зображення ділянки з нормальним станом лісу, отриманого з використанням «ГЕР»

Для створення вибірки примірників кожного з класів були використані супутникові знімки з програми «Google Earth Pro». Кожна категорія містила в собі 11 різних знімків ділянок площиною приблизно 1 кв.км. На рис. 6 наведено приклад структури зображення з цієї вибірки, що відноситься до класу «хмари». Номер зображення в частині вибірки, яка відноситься до класу «хмари», дорівнює 1 (перше зображення цього класу).



Рис. 6. Структура елемента вибірки (приклад)

Вся вибірка складається з файлів типу PNG. Всі зображення вибірки мають розмір 32×32 пікселі. Такий розмір відповідає умовам швидкого та ефективного навчання нейронної мережі. Подальші дії з зображеннями вибірки передбачають визначення каталогів, де будуть зберігатися відповідні дані.

Для каталогів з даними запропоновано таку структуру:

```
# Каталог з набором даних
data_dir = /train;
# Каталог з даними для навчання
train_dir = train;
# Каталог з даними для перевірки
val_dir = val;
# Каталог з даними для тестування
test_dir = test
# Частина набору даних для тестування
test_data_portion = 0.15;
# Частина набору даних для перевірки
val_data_portion = 0.15;
# Кількість елементів даних в одному класі
nb_images = 11.
```

Згідно з наведеною структурою у каталозі «train» зберігаються ті дані, на яких буде навчатися нейронна мережа. У каталозі «val» зберігаються дані для перевірки навченої НМ. У каталозі «test» знаходяться дані для тестування. Для зберігання даних конкретних класів необхідно створити підкаталоги (рис. 7).

```
def create_directory(dir_name):
    if os.path.exists(dir_name):
        shutil.rmtree(dir_name)
    os.makedirs(dir_name)
    os.makedirs(os.path.join(dir_name, "amber"))
    os.makedirs(os.path.join(dir_name, "clouds"))
    os.makedirs(os.path.join(dir_name, "deforestation"))
    os.makedirs(os.path.join(dir_name, "normal"))
create_directory(train_dir)
create_directory(val_dir)
create_directory(test_dir)
```

Рис. 7. Створення розділів для зберігання даних конкретного класу

Створені підкаталоги відповідають кожному з визначених вище класів:

- amber – клас, де зберігаються супутникові знімки із зображенням ділчок, де несанкціоновано видобувають бурштин;
- clouds – клас, де зберігаються супутникові знімки із зображенням захмарених ділянок;
- deforestation – клас, де зберігаються супутникові знімки із зображенням ділянок, де відбувалася несанкціонована вирубка лісу;
- normal – клас, де зберігаються супутникові знімки із зображенням територій, де ліс залишився в нормальному стані.

Наступним кроком є розподілення зображень по цим каталогам та підкаталогам (рис. 8).

```
def copy_images(start_index, end_index, source_dir, dest_dir):
    for i in range(start_index, end_index):
        shutil.copy2(os.path.join(source_dir, "amber." + str(i) + ".png"),
                    os.path.join(dest_dir, "amber"))
        shutil.copy2(os.path.join(source_dir, "clouds." + str(i) + ".png"),
                    os.path.join(dest_dir, "clouds"))
        shutil.copy2(os.path.join(source_dir, "deforestation." + str(i) + ".png"),
                    os.path.join(dest_dir, "deforestation"))
        shutil.copy2(os.path.join(source_dir, "normal." + str(i) + ".png"),
                    os.path.join(dest_dir, "normal"))
    start_val_data_idx = int(nb_images * (1 - val_data_portion - test_data_portion))
    start_test_data_idx = int(nb_images * (1 - test_data_portion))
    copy_images(1, start_val_data_idx, data_dir, train_dir)
    copy_images(start_val_data_idx, start_test_data_idx, data_dir, val_dir)
    copy_images(start_test_data_idx, nb_images, data_dir, test_dir)
```

Рис. 8. Розподіл зображень по каталогах та підкаталогах

Фрагмент коду, наведений на рис. 8, відповідає за розподіл загального набору зображень по каталогах та підкаталогах, які були створені. У підсумку формуються дані, підготовлені до того, щоб навчати, перевіряти і тестувати на них нейронну мережу.

Графічне представлення мережі ЗНМ-Д, побудованої для реалізації поставлених завдань, наведено на рис. 9.

Структура запропонованої ЗНМ, що наведена на рис. 9, містить наступні елементи (зліва направо):

- шар згортки (розмір ядра 3×3, кількість карт ознак – 32 шт., функція активації ReLU);
- шар підвибірки (вибір максимального значення з квадрата 2×2);
- шар згортки (розмір ядра 3×3, кількість карт ознак – 32 шт., функція активації ReLU);
- шар підвибірки (вибір максимального значення з квадрата 2×2);
- шар згортки (розмір ядра 3×3, кількість карт ознак – 64 шт., функція активації ReLU);
- шар підвибірки (вибір максимального значення з квадрата 2×2);
- шар перетворення з двовимірного представлення в одновимірне;
- повнозв’язний шар (64 нейрони, функція активації ReLU);
- шар Dropout;
- вихідний шар (4 нейрони, функція активації sigmoid).

Дана нейронна мережа дозволяє класифікувати зображення ландшафтних ділянок розміру 32×32 пікселя по 4 визначеним вище класам.

Для активації усіх шарів згортки ЗНМ-Д, а також для повнозв’язного шару, обрана функція ReLU, що повертає  $X$ , якщо  $X$  позитивно, а в зворотному випадку повертає 0:

$$A(x) = \max(0, x). \tag{7}$$

Функція ReLU нелінійна за своєю природою, а набори шарів, створені з її застосуванням, теж нелінійні. Діапазон значень ReLU знаходиться між 0 і  $+\infty$ . ReLU дозволяє уникати щільної активації, яка є дуже витратною. Завдяки створенню розрідженої активації, ReLU дозволяє вирішити поставлене завдання при менших витратах. Слід однак відзначити, що функція ReLU частково представлена горизонтальною лінією, а при негативних значеннях  $X$  ця частина має від’ємне значення градієнта. Через це відсутнім є коригування ваги частки, а це, в свою чергу, призводить до того, що нейрони, які перебувають в цьому стані, не реагують на зміни у вхідних даних, що робить частину мережі пасивною.

Втім функція ReLU підходить для створення шарів ЗНМ завдяки тому, що використовує більш прості математичні операції, ніж, наприклад, сигмоїда або гіперболічний тангенс [11].

Для вихідного шару, що містить 4 нейрони, кожен з яких відповідає одному з класів, доцільно використовувати функцію активації sigmoid, що має такий вигляд:

$$A = \frac{1}{1 + e^{-x}}. \tag{8}$$

Важливими перевагами цієї функції є те, що вона не бінарна та має гладкий градієнт. Сигмоїда добре підходить для вихідного шару класифікаційних нейронних мереж, так як вона прагне привести значення до однієї зі сторін кривої. Це дозволяє виділити чіткі межі при отриманні відповіді з приводу віднесення об’єкта до того чи іншого класу.

Також однією з переваг даної функції активації є те, що її значення лежить в діапазоні від 0 до 1 (наприклад, лінійна функція може приймати значення від  $-\infty$  до  $+\infty$ ), що дозволяє уникнути помилок, пов’язаних з великими значеннями активації.

Програмну реалізацію розглянутої структури ЗНМ-Д було здійснено з використанням мови Python та середовища розробки Colab від Google, що дало можливість не тільки зручно формувати НМ, але й додавати допоміжні коментарі в якості заголовків, які дозволяють підкреслити призначення різних частин коду.

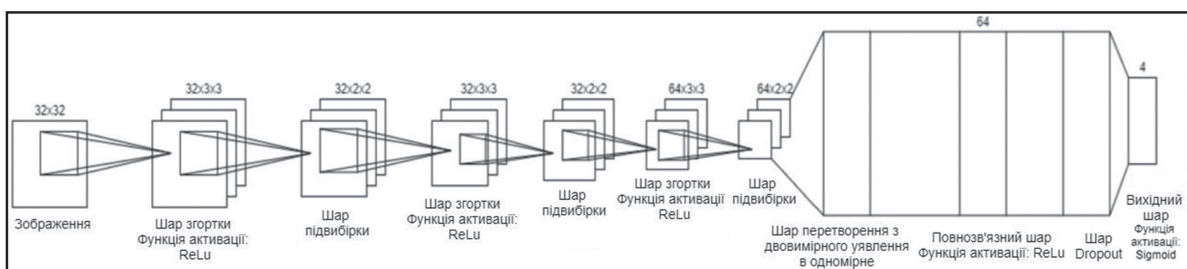


Рис. 9. Структура ЗНМ-Д

На початковому етапі створення ЗНМ-Д були визначені змінні, які в подальшому мають передаватися як параметри (для створення НМ, її навчання, перевірки та тестування) в процедури і функції, а саме:

```
# Розміри зображення
img_width, img_height = 32, 32;
# Розмірність тензору на основі зображення для
вхідних даних ЗНМ-Д
backend Tensorflow, channels_last
input_shape = (img_width, img_height, 3);
# Кількість епох
epochs = 30;
# Розмір мінівибірки
batch_size = 4;
# Кількість класів
num_classes = 4;
# Кількість зображень для навчання
nb_train_samples = 24;
# Кількість зображень для перевірки
nb_validation_samples = 12;
# Кількість зображень для тестування
nb_test_samples = 12
```

Крім змінних, що визначають каталоги з даними, які мають використовуватися для навчання, перевірки та тестування, задаються: розміри зображення (в даному випадку це зображення розміром 32x32 пікселя); розмірність тензора на основі зображення для вхідних даних ЗНМ-Д, де вказуються розміри зображення та кількість каналів. Далі задається кількість епох навчання нейронної мережі на одному і тому ж (навчальному) наборі даних. Крім цього вказуються розмір міні-вибірки, кількість класів і розміри кожної з вибірок.

Після того, як всі параметри визначені, створюються та компілюються шари ЗНМ-Д (рис. 10).

```
model = Sequential()
model.add(Conv2D(32, (3, 3), input_shape=input_shape))
model.add(Activation('relu'))
model.add(MaxPooling2D(pool_size=(2, 2)))

model.add(Conv2D(32, (3, 3)))
model.add(Activation('relu'))
model.add(MaxPooling2D(pool_size=(2, 2)))

model.add(Conv2D(64, (3, 3)))
model.add(Activation('relu'))
model.add(MaxPooling2D(pool_size=(2, 2)))

model.add(Flatten())
model.add(Dense(64))
model.add(Activation('relu'))
model.add(Dropout(0.5))
model.add(Dense(5))
model.add(Activation('sigmoid'))
model.compile(loss='categorical_crossentropy',
              optimizer='adam',
              metrics=['accuracy'])
```

Рис. 10. Компіляція ЗНМ-Д

Слід зауважити, що для створення ЗНМ-Д використовувався фреймворк TensorFlow (TF) з високорівневим API-інтерфейсом Keras, що забезпечує можливість ітеративного налагодження моделі [12].

Для завантаження зображень і їх перетворення було створено генератор зображень (рис. 11).

```
datagen = ImageDataGenerator(rescale=1. / 255)
```

Рис. 11. Створення генератора зображень

Відзначимо, що кожен піксель зображення ділиться на 255, щоб інтенсивність кожного пікселя була в діапазоні від 0 до 1. Це набагато спрощує роботу з зображенням і виключає появу занадто великих чисел і помилок, пов'язаних з цим.

Для навчання на основі зображень з каталогу було створено генератор даних, де зберігаються зображення для навчання (рис. 12). В цьому генераторі використано метод `flow_from_directory`, який завантажує зображення з відповідного каталогу. Так як розмір міні-вибірки дорівнює 4, то кожен раз при зверненні до каталогу «train» ця функція буде завантажувати 4 зображення розміром 32x32 і готувати для них відповідні передбачення, які вказуються в назві кожного з файлів-зображень типу PNG.

```
train_generator = datagen.flow_from_directory(
    train_dir,
    target_size=(img_width, img_height),
    batch_size=batch_size,
    class_mode='categorical')
```

Рис. 12. Генератор даних для навчання на основі зображень з каталогу генератора зображень

Далі було створено генератор даних для перевірки на основі зображень з каталогу. Цей генератор працює за аналогією з попереднім (за методом `flow_from_directory`), а його основною відмінністю є те, що зображення завантажуються з каталогу «val», де зберігаються дані для перевірки (рис. 13).

Слід відзначити, що в останньому аргументі `class_mode` вказано значення «categorical», так як зображення можуть бути розподілені по декількох класах.

```
val_generator = datagen.flow_from_directory(
    val_dir,
    target_size=(img_width, img_height),
    batch_size=batch_size,
    class_mode='categorical')
```

Рис. 13. Генератор даних для перевірки на основі зображень з каталогу генератора зображень

Далі було створено генератор даних для тестування на основі зображень з каталогу «test», де зберігаються зображення для тестування (рис. 14).

```
test_generator = datagen.flow_from_directory(
    test_dir,
    target_size=(img_width, img_height),
    batch_size=batch_size,
    class_mode='categorical')
```

**Рис. 14.** Генератор даних для тестування на основі зображень з каталогу генератора зображень

Наступною дією створення ЗНМ-Д було її навчання за допомогою даних, які надають генератори, з використанням методу `fit_generator`. Основою цього методу є генератор, що використовується для навчання, де в аргументі `steps_per_epoch` задається кількість проходів, яке дорівнює загальній кількості зображень, поділений на розмір міні-вибірки (тобто на 4). Далі задається кількість епох навчання ЗНМ-Д на одному і тому ж наборі даних, що впливає на точність прогнозів, що аналізується на етапі тестування. Наступним аргументом методу `fit_generator` є генератор для перевірки, який був створений раніше. Для нього так само потрібно вказати кількість проходів, яке дорівнює кількості зображень в папці «val», поділений на число зображень міні-вибірки (рис. 15).

```
model.fit_generator(
    train_generator,
    steps_per_epoch=nb_train_samples // batch_size,
    epochs=epochs,
    validation_data=val_generator,
    validation_steps=nb_validation_samples // batch_size)
```

**Рис. 15.** Навчання ЗНМ-Д

Таким чином було побудовано згорткову НМ, здатну розподілити зображення ландшафтних ділянок за чотирима визначеними вище класами.

### 3. Тестування та перспективи розвитку ЗШМ-Д для завдань екологічного моніторингу

Після створення ЗНМ-Д було здійснено аналіз ефективності її навчання на 30 епохах. В табл. 1 наведено результати точності навчання та перевірки досліджуваної мережі в залежності від номера епохи (прийняті позначення: ВН – втрата навчання; ТН – точність навчання, ВП – втрата перевірки; ТП – точність перевірки).

Згідно з результатами аналізу (табл. 1) максимальна точність на навчальній вибірці доходить до 79,17%, в той час як мінімальна втрата становить 66,30%. На перевіркою вибірці максимальна точність досягає 83,33%, а мінімальна втрата – 54,71%.

Результати можна вважати задовільними тому, що вибірки були малі, так як потрібні вибірки в мережі відсутні, а створення навіть невеликої вибірки всього на 11 примірників вичагає чимало часу.

Після цього була розрахована точність нейронної мережі для тестової вибірки:

```
scores = model.evaluate_generator(test_generator,
    nb_test_sample // bath_size)
print («Точність на тестових даних: %. 2f%%»
(scores ) [1] *100)).
```

Слід відзначити, що на тестовій вибірці точність прогнозу показала 91.67%, що є цілком задовільним результатом для згорткових регуляризованих нейронних мереж (з урахуванням малої кількості елементів вибірки).

Відповідь нейронної мережі представлено на зображенні в лівій верхній частині екрана (рис. 16). Завдяки використанню функції активації ReLu, можна визначити ймовірність належності довідповідного класу значення між 0 і 1. Значення, найближче до одиниці, буде означати клас, до якого належить зображення. В даному прикладі зображення належить до класу «Вирубка лісу» («deforestation») і можна помітити, що ЗНМ-Д визначила це згідно з пошуком для цього класу найбільшої ймовірності.

Це підтверджують результати перевірки ЗНМ-Д на навчальній вибірці, приклад якої наведено на рис. 17.

**Таблиця 1**

Точність ЗНМ-Д в залежності від епох навчання

№ епохи	Час, мс	ВН	ТН	ВП	ТП
1	2	3	4	5	6
1	28	1.61	0.25	1.59	0.25
2	14	1.58	0.33	1.56	0.25
3	14	1.55	0.37	1.51	0.33
4	13	1.47	0.25	1.42	0.33
5	14	1.46	0.17	1.36	0.25
6	15	1.24	0.45	1.33	0.25
7	16	1.60	0.21	1.32	0.33
8	13	1.32	0.37	1.32	0.25
9	13	1.25	0.46	1.30	0.42
10	13	1.36	0.46	1.29	0.50
11	14	1.19	0.46	1.24	0.42
12	14	1.27	0.29	1.18	0.50
13	14	1.29	0.50	1.11	0.67
14	14	1.16	0.37	1.05	0.67
15	14	1.09	0.54	0.94	0.67
16	14	0.94	0.67	0.89	0.83
17	15	1.04	0.50	0.78	0.75
18	14	0.88	0.62	0.85	0.75
19	14	0.83	0.54	0.95	0.50
20	13	0.83	0.62	0.79	0.75
21	14	0.76	0.67	0.64	0.75
22	14	0.97	0.62	0.68	0.67
23	14	0.89	0.67	1.03	0.67
24	14	1.22	0.54	0.80	0.83
25	14	0.76	0.58	0.77	0.58
26	14	0.85	0.46	0.73	0.75
27	14	0.78	0.54	0.66	0.75
28	13	0.66	0.71	0.63	0.83
29	14	0.66	0.79	0.57	0.83
30	14	0.76	0.71	0.55	0.83

На рис. 16 наведено приклад розпізнавання мережею ЗНМ-Д зображення ландшафтної ділянки, отриманого з використанням GEP.

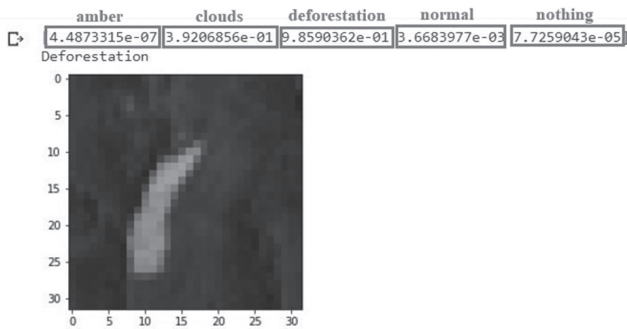


Рис. 16. Приклад розпізнавання зображення ландшафтної ділянки

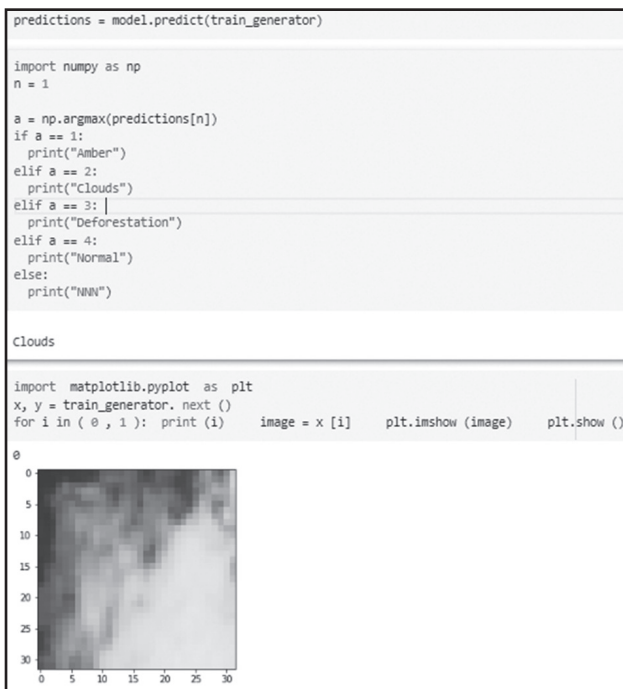


Рис. 17. Розпізнавання зображення, що належить до навчальної вибірки

Аналіз зображень з навчальної вибірки здійснювалося в два етапи, перший з яких формує відповідь ЗНМ-Д, а другий надає зображення, на яке було отримано цю відповідь. З прикладу, наведеному на рис. 17, випливає, що програма коректно віднесла аналізоване зображення до класу «хмари».

Інші результати проведеного тестування запропонованої системи розпізнавання зображень ландшафтних ділянок також підтвердили її працездатність.

Перспективним продовженням досліджень є удосконалення характеристик запропонованої ЗНМ-Д шляхом застосування комбінованих засобів регуляризації мережі та сучасних графічних прискорювачів. Крім того, можуть бути розглянуті інші завдання екологічного моніторингу ландшафтних об'єктів (наприклад, моніторинг лісових пожеж та визначення хворих ділянок лісу), де доцільно впровадження запропонованої ЗНМ-Д.

## Висновки

До важливих завдань екологічного моніторингу за результатами супутникових спостережень слід, зокрема, віднести відстеження зміни ландшафту внаслідок вирубки лісів та видобутку бурштину. Перспективним напрямом вирішення цих завдань є застосування згорткових нейронних мереж (ЗНМ). Однією з головних проблем використання ЗНМ є перенавчання мережі, яке призводить до втрати мережею здатності узагальнення можливих класифікаційних ситуацій. У статті здійснено аналіз методів регуляризації, що сприяють запобіганню ефекту перенавчання в ЗНМ, та визначено переваги методу виключення (dropout). Запропоновано архітектуру ЗНМ, що використовує метод виключення для запобігання її перенавчання. Наводяться результати побудови, навчання та застосування такої мережі для завдань екологічного ландшафтного моніторингу. Детально розглянуто етапи побудови генераторів зображень та компіляції елементів ЗНМ. Побудову ЗНМ здійснено з частковим використанням бібліотеки Keras для мови програмування Python. Зображення ділянок, що передбачається аналізувати в системі екологічного ландшафтного моніторингу, пропонується віднести до чотирьох основних класів (несанкціонована вирубка лісу; несанкціонований видобуток бурштину; захмареність зображень; нормальний стан лісу (без вирубок)). Для формування наборів зображень в роботі використовувався додаток «Google Earth Pro».

Результати проведеного тестування запропонованої системи розпізнавання зображень ландшафтних ділянок підтвердили її працездатність (зокрема, на тестовій вибірці точність прогнозу дорівнює 91.67%, що є цілком задовільним результатом для згорткових регуляризованих нейронних мереж з урахуванням малої кількості елементів вибірки).

Розроблена система розпізнавання зображень ландшафтних ділянок є гнучкою та розширюваною, що робить можливим її подальше удосконалення у напрямку підвищення точності розпізнавання та розширення функцій.

## Список літератури:

- [1] Зацерковний В. І. Геоінформаційні системи і бази даних: монографія. – Кн. 2 / В. І. Зацерковний, В. Г. Бурачек, О. О. Железняк, А. О. Терещенко. – Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2017. – 237 с.
- [2] Луньова О.В. Методологічні засади застосування орто-трансформованих космічних знімків для оцінки стану навколишнього середовища та програмне забезпечення досліджень / О.В. Луньова, О.В. Буглак // Український журнал дистанційного зондування Землі – 2019. № 22. – С. 27–34.
- [3] Бондар О.І. та ін. Моніторинг стану навколишнього середовища засобами ГІС / О.І. Бондар та ін. // К. : ДЕА (Державна екологічна академія), 2018. – 52 с.

- [4] *Hnatushenko V.V.* Satellite Monitoring of Consequences of Illegal Extraction of Amber in Ukraine / V.V. Hnatushenko, D.K. Mozgovyi, V.V. Vasyliiev, O.O. Kavats // Scientific bulletin of National Mining University. State Higher Educational Institution «National Mining University». Dnipropetrovsk. – 2017. No 2 (158). – P. 99–105.
- [5] *Schmidhuber J.* Deep learning in neural networks: An overview / J. Schmidhuber // *Neural networks*. – 2015. – V. 61. – P. 85–117.
- [6] *Bezsonov O.* Processing of noisy digital images with use of evolving autoencoders / O. Bezsonov, O. Rudenko, S. Udovenko, O. Dudinova // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 6/9(90). – 2017. – P. 63–69.
- [7] *McCann M.* Convolutional neural networks for inverse problems in imaging / M. McCann, K. Jin., M Unser // *A review //IEEE Signal Processing Magazine*. – 2017. – V. 34. – № 6. – P. 85–95.
- [8] *Sikorskiy O.* Convolutional neural networks in image classification / O. Sikorskiy // *Information Innovative Technologies* – 2017. – №1. – P. 397–401.
- [9] *Gatys L.* Image style transfer using convolutional neural networks / L. Gatys., A. Ecker, M. Bethge // *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. – 2016. – P. 2414–2423.
- [10] *Srivastava N.* Dropout: A Simple Way to Prevent Neural Networks from Overfitting / N. Srivastava, G. Hinton, A. Krizhevsky, I. Sutskever, R. Salakhutdinov // *Journal of Machine Learning Research*. – 15(56). – 2014 – P. 1929–1958.
- [11] *Miikkulainen R.* et al. Evolving deep neural networks // *Artificial Intelligence in the Age of Neural Networks and Brain Computing*. – Academic Press, 2019. – P. 293–312.
- [12] *Білашенко С.В.* Розпізнавання зображень за допомогою згорткових нейронних мереж з використанням бібліотеки Keras / С.В. Білашенко, Н. Н. Шаповалова, О.Г. Рибальченко // *Гірничий вісник*. – 2018. – Вип. 103. – С. 148–154.

*Надійшла до редколегії 18.03.2020*

УДК 004.852

DOI 10.30837/bi.2020.1(94).04



А.А. Бессонов<sup>1</sup>, К.О. Олейник<sup>2</sup>, О.С. Романюк<sup>3</sup>, О.Г. Руденко<sup>4</sup>, Н.Н. Сердюк<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Доктор технических наук, профессор кафедры компьютерных интеллектуальных систем и техногий, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, oleksandr.bezsonov@nure.ua, ORCID iD 0000-0001-6104-4275

<sup>2</sup>Аспирант Харьковского национального университета радиоэлектроники, kirill.oleynik.olegovich@gmail.com, ORCID iD 0000-0001-8536-5217

<sup>3</sup>Аспирант Харьковского национального университета радиоэлектроники, romanyk@gmail.com, ORCID iD 0000-0003-3278-1772

<sup>4</sup>Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры компьютерных интеллектуальных систем и техногий, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, oleh.rudenko@nure.ua, ORCID iD 0000-0003-0859-2015

<sup>5</sup>Кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных интеллектуальных систем и техногий, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, nataliya.serdyuk@nure.ua, ORCID iD 0000-0002-0107-4365

## ФАКТОРИЗОВАННЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБУЧЕНИЯ ПЕРСЕПТРОНА В ЗАДАЧЕ ПОСТРОЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ

З метою поліпшення обчислювальних властивостей процедур навчання штучних нейронних мереж (ІНС), які, будучи універсальними аппроксиматорами, дозволяють відновити з заданою точністю будь-яку як завгодно складну безперервну нелінійну функцію, розроблені їх факторизовані форми, засновані на перетвореннях Холесского, Хаусхолдера і ортогоналізації Грама-Шмідта. Проведений аналіз їх властивостей показав, що найбільш ефективним способом підвищення стійкості алгоритму навчання є застосування перетворення Хаусхолдера.

ШТУЧНА НЕЙРОННА МЕРЕЖА, ПЕРСЕПТРОННА МОДЕЛЬ, КРИТЕРІЙ ОЦІНЮВАННЯ, ОРТОГОНАЛІЗАЦІЯ, СТІЙКІСТЬ АЛГОРИТМУ НАВЧАННЯ, ФАКТОРИЗАЦІЯ

С целью улучшения вычислительных свойств процедур обучения искусственных нейронных сетей (ИНС), которые, являясь универсальными аппроксиматорами, позволяют восстановить с заданной точностью любую сколь угодно сложную непрерывную нелинейную функцию, разработаны их факторизованные формы, основанные на преобразованиях Холесского, Хаусхолдера и ортогонализации Грама-Шмидта. Проведенный анализ их свойств показал, что наиболее эффективным способом повышения устойчивости алгоритма обучения является применение преобразования Хаусхолдера.

ИСКУССТВЕННАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ, ПЕРСЕПТРОННАЯ МОДЕЛЬ, КРИТЕРИЙ ОЦЕНИВАНИЯ, ОРТОГОНАЛИЗАЦИЯ, УСТОЙЧИВОСТЬ АЛГОРИТМА ОБУЧЕНИЯ, ФАКТОРИЗАЦИЯ

In order to improve the computational properties of training procedures for artificial neural networks (ANNs), which, being universal approximators, make it possible to restore any arbitrarily complex continuous nonlinear function with a given accuracy, their factorized forms have been developed based on the Cholesky, Householder transformations and Gram-Schmidt orthogonalization. The analysis of their properties showed that the most effective way to increase the stability of the learning algorithm is to use the Householder transformation.

ARTIFICIAL NEURONAL NETWORK, PERSEPTRONIC MODEL, EVALUATION CRITERION, ORTHOGONALIZATION, STABILITY OF THE LEARNING ALGORITHM, FACTORIZATION

### Введение

В основе многих задач обработки информации (обработка и фильтрация сложных сигналов, идентификация объектов и управление ими, прогнозирование временных последовательностей и т.д.) лежит задача построения в общем случае нелинейной модели вида:

$$y^*(k) = f(\theta_0, u(k)) + \xi(k), \quad (1)$$

где  $y^*(k)$  — вектор выходных сигналов  $M \times 1$ ;  $u(k)$  — матрица входных сигналов  $L \times M$ ;  $\theta_0$  — вектор неизвестных параметров  $L \times 1$ ;  $f(\bullet)$  — неизвестная нелинейная функция;  $\xi(k)$  — помеха.

Отсутствие информации о виде нелинейности зачастую приводит к неэффективности традиционных методов построения модели, а в ряде случаев — к их неприменимости. Альтернативой традиционным методам является применение нейросетевых технологий.

Являясь универсальными аппроксиматорами, некоторые типы ИНС позволяют восстановить с заданной точностью любую сколь угодно сложную непрерывную нелинейную функцию, используя представления аппроксимируемой функции в виде нейронной сети, образованной нейронами,

параметры которых определяются путем ее обучения. Наибольшее распространение при решении такой задачи получили сети прямого распространения или многослойный персептрон (МП). Хотя в настоящее время существует достаточно большое число алгоритмов настройки его параметров, задача обеспечения устойчивости его обучения является весьма актуальной.

### Алгоритм обучения персептрона

При поступлении обучающей пары

$$\{u(k), y^*(k)\} \quad k=1,2,\dots$$

можно записать для сигнала  $y^*(k)$  следующее выражение:

$$y^*(k) = f(\hat{\theta}(k-1), u(k)) + \mathbf{H}^T(k)(\theta_0 - \hat{\theta}(k-1)) + \rho(k) + e(k), \quad (2)$$

где  $e(k) = y^*(k) - f(\hat{\theta}(k), u(k))$ ;  $\hat{\theta}(k)$  — оценка вектора  $\theta_0$ ;  $\mathbf{H}(k)$  — матрица  $L \times M$

$$\mathbf{H}(k) = \left. \frac{\partial f(\theta, u(k))}{\partial \theta} \right|_{\theta = \hat{\theta}(k-1)} ;$$

$\rho(k)$  — остаток при разложении  $f(\bullet)$  в ряд Тейлора, содержащий члены второго порядка и выше.

Выражение (2) перепишем в виде

$$y^*(k) = \mathbf{H}^T(k)\theta_0 + \xi(k) + e(k), \quad (3)$$

где  $\xi(k) = f(\hat{\theta}(k-1), u(k)) - \mathbf{H}^T(k)\hat{\theta}(k-1) + \rho(k)$ .

Оценивание неизвестного вектора параметра  $\theta$ , получаемое путем минимизации взвешенного квадратичного функционала

$$E(k) = \sum_{j=1}^k \|e(j)\|^2 \lambda^{k-j}, \quad (4)$$

имеет вид

$$\hat{\theta}(k) = \Phi^{-1}(k)\mathbf{r}(k), \quad (5)$$

где

$$\Phi(k) = \sum_{j=1}^k \mathbf{H}(j)\mathbf{H}^T(j)\lambda^{k-j}; \quad (6)$$

$$\mathbf{r}(k) = \sum_{j=1}^k \lambda^{k-j} \mathbf{H}(j)(y^*(j) - \xi(j)). \quad (7)$$

При получении (5) предполагалось, что остаточная последовательность  $\xi(k)$  не зависит от  $\theta_0$ . Воспользовавшись стандартным приемом, т.е. представлением входящих в (5) векторов и матриц в блочной форме, и применяя лемму об обращении матриц, несложно получить следующие рекуррентные соотношения [1]:

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \mathbf{K}(k)(y^*(k) - f(\hat{\theta}(k-1), u(k))); \quad (8)$$

$$\mathbf{K}(k) = \lambda^{-1} \mathbf{P}(k-1) \mathbf{H}(k) [\mathbf{I} + \lambda^{-1} \mathbf{H}^T(k) \mathbf{P}(k-1) \mathbf{H}(k)]^{-1}; \quad (9)$$

$$\mathbf{P}(k) = \lambda^{-1} [\mathbf{P}(k-1) - \mathbf{K}(k) \mathbf{H}^T(k) \mathbf{P}(k-1)], \quad (10)$$

$$\mathbf{P}(0) = \delta^{-1} \mathbf{I}, \quad \delta > 0.$$

Здесь  $\mathbf{K}$  — матрица усиления Калмана  $L \times N$ , а  $\mathbf{P}(k) = \Phi^{-1}(k)$  — матрица  $L \times L$ .

### Вычисление матрицы градиентов $\mathbf{H}(k)$ .

Нумеруя нейроны от 1 до  $S$ , так что

$$\theta = (\mathbf{w}_1^T, \mathbf{w}_2^T, \dots, \mathbf{w}_S^T),$$

перепишем уравнение (3) в виде

$$\begin{pmatrix} y_1^*(k) \\ y_2^*(k) \\ \vdots \\ y_M^*(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left( \frac{\partial y_1}{\partial \mathbf{w}_1} \right)^T & \left( \frac{\partial y_1}{\partial \mathbf{w}_2} \right)^T & \dots & \left( \frac{\partial y_1}{\partial \mathbf{w}_S} \right)^T \\ \left( \frac{\partial y_2}{\partial \mathbf{w}_1} \right)^T & \left( \frac{\partial y_2}{\partial \mathbf{w}_2} \right)^T & \dots & \left( \frac{\partial y_2}{\partial \mathbf{w}_S} \right)^T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left( \frac{\partial y_M}{\partial \mathbf{w}_1} \right)^T & \left( \frac{\partial y_M}{\partial \mathbf{w}_2} \right)^T & \dots & \left( \frac{\partial y_M}{\partial \mathbf{w}_S} \right)^T \end{pmatrix} \square \begin{pmatrix} \mathbf{w}_1 \\ \mathbf{w}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{w}_S \end{pmatrix} \square \begin{pmatrix} e_1(k) \\ e_2(k) \\ \vdots \\ e_M(k) \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где  $\mathbf{w}_i$  — вектор, содержащий веса нейрона  $i$ ;

$$\tilde{e}(k) = \xi(k) + \mathbf{e}(k).$$

Рассмотрим  $i$ -ый нейрон МСП, характеризуемый  $(M_i + 1)$ -размерным вектором весов  $\mathbf{w}_i$  и входным вектором  $\mathbf{u}_i = (1, u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{iM_i})^T$ .

Отдельный  $i$ -й нейрон на глобальном выходе  $y(k)$  локально представлен в матрице (11)  $i$ -ым столбцом

$$\mathbf{H}_i^T(k) = \begin{pmatrix} \left( \frac{\partial y_1}{\partial \mathbf{w}_i} \right)^T \\ \left( \frac{\partial y_2}{\partial \mathbf{w}_i} \right)^T \\ \vdots \\ \left( \frac{\partial y_M}{\partial \mathbf{w}_i} \right)^T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial y_1}{\partial z_i} \left( \frac{\partial z_i}{\partial \mathbf{w}_i} \right)^T \\ \frac{\partial y_2}{\partial z_i} \left( \frac{\partial z_i}{\partial \mathbf{w}_i} \right)^T \\ \vdots \\ \frac{\partial y_L}{\partial z_i} \left( \frac{\partial z_i}{\partial \mathbf{w}_i} \right)^T \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Здесь  $z$  означает выход  $i$ -го нейрона, а элементы матрицы (12) вычисляются с помощью обычного алгоритма обратного распространения.

### Факторизованные алгоритмы обучения

Наличие операции вычитания при вычислении матрицы  $\mathbf{P}(k)$  (10) приводит с ростом  $\mathbf{K}$  к численной неустойчивости алгоритма (8)-(10). Для устранения расходимости метода и улучшения свойств матрицы  $\mathbf{P}(k)$  используется какой-либо из методов факторизации [2, 3], т.е. ортогональное разложение

или представление в общем случае  $m \times n$ -матрицы  $\mathbf{P}$  ранга  $l$  произведением вида  $\mathbf{H}\mathbf{R}\mathbf{K}^T$ , где  $\mathbf{H}$  и  $\mathbf{K}$  — ортогональные матрицы размерностей  $m \times m$  и  $n \times n$  соответственно, а  $\mathbf{R}$  — матрица вида

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{11} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

где  $\mathbf{R}_{11}$  —  $l \times l$  матрица ранга  $l$ . Выбором  $\mathbf{H}$  и  $\mathbf{K}$  можно добиться, чтобы  $\mathbf{R}_{11}$  была верхней или нижней треугольной. Более того, эту невырожденную подматрицу  $\mathbf{R}_{11}$  можно упростить так, чтобы она стала невырожденной диагональной матрицей.

На основании того, что положительно определенная симметричная матрица  $\mathbf{P}^T\mathbf{P}$  допускает спектральное разложение

$$\mathbf{P}^T\mathbf{P} = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{U}^T, \quad (13)$$

где  $\mathbf{U}$  — ортогональная  $n \times n$ -матрица;  $\mathbf{D}$  — диагональная матрица с положительными и невозрастающими элементами, был разработан целый ряд методов факторизации, отличающихся способом формирования матриц и необходимыми вычислительными затратами. Среди этих методов в первую очередь следует отметить алгоритм Хаусхолдера [4], ортогонализация Грамма-Шмидта [5, 6], разложение Холесского (метод квадратного корня) [2] и вращения Гивенса [6].

#### Факторизация модели методом квадратного корня

Наибольшее распространение в теории управления и теории идентификации получила факторизация с использованием разложения Холесского, основанного на факте существования верхней треугольной (действительной)  $n \times n$ -матрицы  $\mathbf{S}$  такой, что

$$\mathbf{S}\mathbf{S}^T = \mathbf{P}. \quad (14)$$

Это объясняется, по-видимому, тем, что оно допускает рекуррентное вычисление, т.е. может осуществляться, как и сам процесс идентификации, в реальном времени. Кроме того, метод квадратного корня основан на эквивалентности задачи наименьших квадратов  $Ax = b$  и системы нормальных уравнений  $(A^T A)x = A^T b$  и требует примерно вдвое меньше операций, чем алгоритм Хаусхолдера. При оценивании же параметров в случае последовательно накапливаемых данных оба эти метода требуют примерно одинаковое число ячеек памяти.

В работе [5] рассмотрены две формы разложения Холесского — ковариационная и информационная.

Так для рекуррентного МНК, обеспечивающего минимум функционалу

$$\mathbf{V}(k) = \mathbf{e}^T(k)\mathbf{W}(k)\mathbf{e}(k), \quad (15)$$

где  $\mathbf{e}(k) = \mathbf{y}^*(k) - \hat{\mathbf{y}}(k)$  — ошибка оценивания;  $\mathbf{W}(k)$  — весовая матрица,

$$\mathbf{W}(k) = \begin{bmatrix} \lambda^k & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \lambda^{k-1} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{W}(k) = \begin{bmatrix} \lambda\mathbf{W}(k-1) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$\lambda \in (0, 1]$  — параметр взвешивания, ковариационная форма дискретного метода квадратного корня имеет вид

$$\begin{cases} \hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \gamma(k-1)\mathbf{e}(k-1); \\ \gamma(k-1) = \alpha(k-1)\mathbf{S}^T(k-1)\mathbf{f}(k-1); \\ \mathbf{f}(k-1) = \mathbf{S}^T(k-1)\mathbf{H}(k); \\ \mathbf{S}(k) = [\mathbf{S}(k-1) - \mathbf{g}(k-1)\gamma(k-1)\mathbf{f}^T(k-1)]\lambda^{-\frac{1}{2}}(k-1); \\ \alpha^{-1}(k-1) = \mathbf{H}^T(k-1)\mathbf{H}(k-1) + \lambda(k-1); \\ \mathbf{g}(k-1) = \left(1 + \sqrt{\lambda(k-1)\alpha(k-1)}\right)^{-1}; \\ \mathbf{S}_0 = \sqrt{\alpha}\mathbf{I}; \hat{\theta}_0 = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Как видно из (16), параметр взвешивания  $\lambda(k)$  выбирается переменным, но таким, чтобы

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \lambda(k) = 1.$$

Соотношения, описывающие дискретный метод квадратного корня в информационной форме, записываются следующим образом. Так как на  $k$ -ом такте МНК оценка имеет вид

$$\mathbf{P}^{-1}(k)\hat{\theta}(k) = \mathbf{H}^T(k)\mathbf{y}(k) = \mathbf{f}(k), \quad (17)$$

а матрица  $\mathbf{P}^{-1}(k)$  и вектор  $\mathbf{f}(k)$  связаны с  $\mathbf{P}^{-1}(k-1)$  и  $\mathbf{f}(k-1)$  рекуррентными соотношениями соответственно

$$\begin{cases} \mathbf{P}^{-1}(k) = \lambda(k)\mathbf{P}^{-1}(k-1) + \mathbf{H}(k-1)\mathbf{H}^T(k); \\ \mathbf{f}(k) = \lambda(k)\mathbf{f}(k-1) + \mathbf{H}(k-1)\mathbf{y}(k), \end{cases} \quad (18)$$

то с учетом вида разложения (14) можно записать

$$\mathbf{S}^{-1}(k)\hat{\theta}(k) = \mathbf{b}(k). \quad (19)$$

Это следует из ортогональной трансформации матрицы  $(\mathbf{T}^T\mathbf{T} = \mathbf{I})$

$$\mathbf{H}^T\mathbf{T}^T\mathbf{T}\mathbf{H}\hat{\mathbf{Q}} = \mathbf{H}^T\mathbf{T}^T\mathbf{T}\mathbf{y}, \quad (20)$$

откуда матрица

$$\mathbf{T}\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}^{-1} \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}$$

является верхней треугольной.

Обозначим

$$\mathbf{T}\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \mathbf{b} \\ \dots \\ \mathbf{W} \end{bmatrix}.$$

Тогда из (20) для  $k$ -го такта получаем

$$\mathbf{T}(k)\mathbf{H}(k)\hat{\boldsymbol{\theta}}(k) = \mathbf{T}(k)\mathbf{y}(k),$$

откуда следует рекуррентное соотношение

$$\begin{bmatrix} \mathbf{S}^{-1}(k) \\ 0^T \end{bmatrix} = \mathbf{T}(k) \begin{bmatrix} \sqrt{\lambda}\mathbf{S}^{-1}(k-1) \\ \mathbf{H}^T(k) \end{bmatrix}; \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{b}(k) \\ \mathbf{W}(k) \end{bmatrix} = \mathbf{T}(k) \begin{bmatrix} \sqrt{\lambda}\mathbf{b}(k-1) \\ \mathbf{y}(k) \end{bmatrix}, \quad (22)$$

служащее для определения  $\mathbf{S}^{-1}(k)$  и  $\mathbf{b}(k)$ . Получаемые в результате решения (21) и (22)  $\mathbf{S}^{-1}(k)$  и  $\mathbf{b}(k)$  используются для нахождения  $\hat{\boldsymbol{\theta}}(k)$  в соответствии с (19).

Помимо рассмотренного разложения Холецкого достаточно широко используется  $\mathbf{UD}$ -факторизация, использующая представления вида (16) и разработанная в [3]. В этом разложении  $\mathbf{U}$  — верхняя треугольная матрица с единичными элементами на диагонали, а  $\mathbf{D}$  — диагональная матрица

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d(1) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & d(2) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & d(k) \end{bmatrix}.$$

Учитывая соотношение между  $\mathbf{P}(k)$  и  $\mathbf{P}(k-1)$ , для данного разложения можно записать

$$\mathbf{U}(k)\mathbf{D}(k)\mathbf{U}(k) = \frac{1}{\lambda}[\mathbf{U}(k-1)\mathbf{D}(k-1)\mathbf{U}(k-1) - \gamma(k-1)\mathbf{H}(k)\mathbf{U}(k-1)\mathbf{D}(k-1)\mathbf{U}^T(k-1)] \quad (23)$$

или

$$\mathbf{U}(k)\mathbf{D}(k)\mathbf{U}(k) = \frac{1}{\lambda}\mathbf{U}(k-1)[\mathbf{D}(k-1) - \frac{1}{\alpha(k-1)}\mathbf{V}(k-1)\mathbf{f}^T(k-1)\mathbf{D}(k-1)]\mathbf{U}^T(k-1),$$

где

$$\begin{aligned} \mathbf{f}(k-1) &= \mathbf{U}^T(k-1)\mathbf{H}(k); \\ \mathbf{V}(k-1) &= \mathbf{D}(k-1)\mathbf{f}(k-1); \\ \alpha(k-1) &= \lambda + \mathbf{f}^T(k-1)\mathbf{V}(k-1) \end{aligned}$$

При этом входящий в (23) параметр  $\gamma(k-1)$  вычисляется так

$$\gamma(k-1) = \frac{1}{\alpha(k-1)}\mathbf{U}(k-1)\mathbf{V}(k-1).$$

В [3] были предложены следующие рекуррентные соотношения для вычисления элементов матриц  $\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{D}$  и  $\gamma$ :

$$\begin{aligned} \alpha_j &= \alpha_{j-1} + \mathbf{V}_j\mathbf{f}_j; \\ \alpha_j(k) &= \alpha_j(k-1)\alpha_{j-1}/(\alpha_j - \lambda); \\ \mathbf{b}_j &= \mathbf{V}_j; \end{aligned} \quad (24)$$

$$\mathbf{V}_j = -\mathbf{f}_j/\alpha_{j-1}; \quad j = 2, \dots, 2k$$

с начальными условиями

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \lambda + \mathbf{V}_1\mathbf{f}_1; \\ \alpha_1(k) &= \alpha_1(k-1)/(\alpha_1\lambda); \\ \mathbf{b}_1 &= \mathbf{V}_1. \end{aligned}$$

На каждом такте  $j$  элементы матрицы  $\mathbf{U}$  вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} u_{ij}(k) &= u_{ij}(k-1) + r_j b_i; \\ b_i &:= b_i + u_{ij}V_j, \quad i = 1, \dots, j-1. \end{aligned} \quad (25)$$

Сама же процедура вычисления факторизованной оценки принимает вид

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(k) = \hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1) + \gamma(k)\mathbf{e}(k),$$

где  $\mathbf{e}(k) = \mathbf{y}(k) + \mathbf{H}^T(k)\hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1)$ ;  $\gamma(k) = (\alpha(2k))^{-1}\mathbf{b}$  (вычисление  $\alpha(2m)$  производится с использованием соотношений (24), (25)).

Все рассмотренные методы факторизации приводят к численно устойчивым алгоритмам обучения, так как в используемых соотношениях уже отсутствует трансформация Гаусса, являющаяся причиной неустойчивости, а обусловленность матрицы  $\mathbf{P}$  понижается вдвое.

### Факторизация с помощью алгоритма Хаусхолдера

Как отмечается в [2], хотя метод Холецкого требует вдвое меньше операций, чем алгоритм Хаусхолдера, для получения им того же качества решения, что и в алгоритме Хаусхолдера при относительной точности  $\eta$ , здесь необходимо работать с точностью  $\eta^2$ . Кроме того, если в качестве единицы хранения используется машинное слово одинаковой для обоих методов длины, алгоритм Хаусхолдера сможет обрабатывать более широкий класс задач, чем алгоритм нормальных уравнений.

При использовании проекционных методов мы имеем дело с недоопределенной задачей полного ранга, а это в свою очередь приводит к некоторым особенностям вычисления факторизованной оценки  $\hat{\boldsymbol{\theta}}(k)$ . Поэтому представляется более эффективным для повышения вычислительной устойчивости процедур обучения использовать алгоритм Хаусхолдера [4], позволяющий построить ортогональную матрицу

$$\mathbf{Q} = \mathbf{I}_N + \mathbf{b}^{-1}\mathbf{u}\mathbf{u}^T,$$

где  $\mathbf{u}$  — вектор  $N \times 1$  такой, что  $\|\mathbf{u}\| \neq 0$ ;

$$\mathbf{b} = -\|\mathbf{u}\|^2/2.$$

В этом случае алгоритм обучения принимает вид

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(k) = \hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1) + \gamma\bar{\boldsymbol{\Theta}}, \quad (26)$$

где  $\bar{\boldsymbol{\Theta}}$  вычисляется по следующему алгоритму:

$$\mathbf{H}_S^T(k)\mathbf{Q}_S(k) = [\mathbf{L}_S(k):0]; \quad (27)$$

$$\mathbf{L}_S(k)\mathbf{z}(k) = \mathbf{E}_S(k); \quad (28)$$

$$\mathbf{z}(k) = \bar{\mathbf{R}}_S^{-1}(k)\mathbf{E}_S(k); \quad (29)$$

$$\bar{\boldsymbol{\Theta}}(k) = \mathbf{Q}_S(k) \begin{bmatrix} \mathbf{z}(k) \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{Q}_S(k)\mathbf{z}(k). \quad (30)$$

Здесь  $\bar{\mathbf{R}}_S(k)$  —  $s \times s$ -матрица ранга  $s$ ;  $\mathbf{Q}_S(k)$  — ортогональная  $N \times N$  — матрица;  $\mathbf{L}_S(k)$  — нижняя треугольная  $s \times s$ -матрица.  $\mathbf{z}(k)$  — единственное решение уравнения  $\bar{\mathbf{R}}_S(k)\mathbf{z}(k) = \mathbf{E}_S(k)$ .

Ортогональная матрица  $\mathbf{Q}_S(k)$  определяется из условия

$$\mathbf{Q}_i(k)\mathbf{H}(i) = \begin{pmatrix} \mathbf{H}_1(i) \\ \dots \\ \mathbf{H}_{p-1}(i) \\ -\sigma \left( \mathbf{H}_p^2(i) + \sum_{j=l}^N \mathbf{H}_j^2(i) \right)^{1/2} \\ \mathbf{H}_{p+1}(i) \\ \dots \\ \mathbf{H}_{l-1}(i) \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix} = u(i),$$

где  $1 \leq p \leq N$ ;  $p > l$ .

Шаги численного процесса, который приводит к ортогональной  $N \times N$  матрице  $\mathbf{Q}$ , отвечающей целым параметрам  $p, l, N$ , можно свести в следующую схему [2]:

$$\mathbf{Q}^i(k) = \begin{cases} \mathbf{I}_N + \mathbf{b}^{-1} \mathbf{v}^i(k) (\mathbf{v}^i(k))^T, & \mathbf{b} \neq 0, \quad i = 1, \dots, s; \\ \mathbf{I}_N, & \mathbf{b} = 0; \end{cases}$$

$$\mathbf{b} = \mathbf{g}^i \mathbf{v}_p^i(k);$$

$$\mathbf{v}_j^i(k) = 0, \quad j = 1, \dots, p-1, \quad 1 \leq p \leq N; \quad \mathbf{v}_p^i(k) = \mathbf{H}_p(i) - \mathbf{g}^i;$$

$$\mathbf{v}_j^i(k) = 0, \quad j = p+1, \dots, l-1, \quad p < l;$$

$$\mathbf{v}_j^i(k) = \mathbf{H}_j(i), \quad j = l, \dots, N;$$

$$\mathbf{g}^i = -\sigma \left( \mathbf{H}_p^2(i) + \sum_{j=1}^N \mathbf{H}_j^2(i) \right)^{1/2};$$

$$\sigma = \begin{cases} 1, & \mathbf{H}_p(i) \geq 0; \\ -1, & \mathbf{H}_p(i) < 0. \end{cases}$$

Указанные действия преобразуют вектор  $\mathbf{H}(k)$  следующим образом:

1. Компоненты вектора  $\mathbf{H}(k)$  с номерами  $1, \dots, p-1$  не меняются при  $p > 1$
2. Главная компонента вектора  $\mathbf{H}(k)$  с номером  $p$  может не меняться.
3. Компоненты вектора  $\mathbf{H}(k)$  с номерами  $p+l, \dots, l-1$  не меняются при  $p < l-1$ .
4. Компоненты вектора  $\mathbf{H}(k)$  с номерами  $1, \dots, N$  должны быть аннулированы при  $l'' N$ .

Таким образом, матрица  $\mathbf{Q}_S(k)$  может быть представлена в виде произведения  $s$  преобразований Хаусхолдера

$$\mathbf{Q}_S(k) = \mathbf{Q}^1(k) \dots \mathbf{Q}^s(k).$$

Нижняя треугольная матрица  $\mathbf{L}_S(k)$  вычисляется следующим образом:

$$\mathbf{H}_S(k) \mathbf{Q}_S(k) = \mathbf{H}_S(k) \mathbf{Q}^1(k) \dots \mathbf{Q}^s(k) =$$

$$= \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{H}}_1(k) & 0 & \dots & 0 \\ \bar{\mathbf{H}}_1(k-1) & \bar{\mathbf{H}}_2(k-1) & & \dots 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ \bar{\mathbf{H}}_1(k-s+1) & \dots & \bar{\mathbf{H}}_s(k-s+1) & 0 \dots 0 \end{bmatrix} =$$

$$= (\bar{\mathbf{H}}(k), \bar{\mathbf{H}}(k-1), \dots, \bar{\mathbf{H}}(k-s+1)) = [\mathbf{L}_S(k); 0].$$

Преобразования Хаусхолдера векторов  $\mathbf{H}(j)$  выполняются в соответствии с правилом

$$\bar{\mathbf{H}}(j) = \bar{\mathbf{H}}(j) + \mathbf{c}_j \mathbf{v}^i(k);$$

$$\mathbf{c}_j = \mathbf{b}^{-1} \mathbf{H}^T(j) \mathbf{v}^i(k), \quad j = i+1, \dots, s$$

Для реализации машинной программой процесс построения ортогонального  $N \times N$ -преобразования, состоящего во вращении строк матрицы  $\mathbf{H}_S^T(k)$ , можно переписать в следующей алгоритмической форме:

$$\mathbf{g}^i = -\sigma \left( \mathbf{H}_i^2(i) + \sum_{l=i+1}^N \mathbf{H}_l^2(i) \right)^{1/2},$$

$$i = k, k-1, \dots, k-S+1;$$

$$\sigma = \begin{cases} 1, & \mathbf{H}_i(i) \geq 0; \\ -1, & \mathbf{H}_i(i) < 0; \end{cases}$$

$$\mathbf{h}_i(k) = \mathbf{H}_i(i) - \mathbf{g}^i;$$

$$\mathbf{H}_i(i) = \mathbf{g}^i.$$

Построение преобразования вектора  $\mathbf{H}(i)$  закончено. Применение полученного ортогонального преобразования к векторам  $\mathbf{H}(i)$  ( $j = i+1, \dots, S$ ) осуществляется в соответствии с алгоритмом

$$\mathbf{b} = \mathbf{H}_i(i) \mathbf{h}_i(k), \quad \text{при } \mathbf{b} \neq 0;$$

$$\mathbf{d} = \frac{\mathbf{H}_i(j) \mathbf{h}_i(k) + \sum_{l=i+1}^N \mathbf{H}_l(j) \mathbf{H}_l(i)}{\mathbf{b}}, \quad j = 1, \dots, s-i;$$

$$\mathbf{H}_i(j) = \mathbf{H}_i(j) + \mathbf{d} \mathbf{h}_i(k);$$

$$\mathbf{H}_l(j) = \mathbf{H}_l(j) + \mathbf{d} \mathbf{H}_l(k), \quad l = i+1, \dots, s$$

Таким образом, алгоритмическая форма вычислений (30)-(33), удобная для реализации машинной программой, может быть записана так:

$$\bar{\Theta}_1(k) = \frac{\hat{\Theta}_1(k)}{\mathbf{H}_1(k)};$$

$$\bar{\Theta}_i(k) = \mathbf{H}_i^{-1}(i) \left( \hat{\Theta}_i(k) - \sum_{j=1}^{i-1} \mathbf{H}_i(i) \hat{\Theta}_j(k) \right),$$

$$j = k-1, \dots, k-s+1$$

$$\bar{\mathbf{Q}}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_s(k) \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{b} = \mathbf{H}_j(j) \mathbf{h}_j(k), \quad j = k-s+1, k-s, \dots, 1;$$

$$\mathbf{d} = \frac{\bar{\mathbf{Q}}_j(k) \mathbf{h}_j(k) + \sum_{i=j+1}^N \bar{\mathbf{Q}}_i(k) \mathbf{H}_i(j)}{\mathbf{b}};$$

$$\bar{\mathbf{Q}}_i(k) = \bar{\mathbf{Q}}_i(k) + \mathbf{d} \mathbf{H}_i(j), \quad i = j+1, \dots, N.$$

### Ортогонализация Грама-Шмидта

Наконец, еще одно преобразование от косоугольной системы к ортонормированной осуществляется за  $s$  шагов по следующему правилу [2,6]:

1) нормируется вектор

$$\mathbf{H}(k-s+1) \gamma_{11} = \|\mathbf{H}(k-s+1)\|^{-1};$$

$$\bar{\mathbf{H}}(1) = \mathbf{H}(k-s+1) \|\mathbf{H}(k-s+1)\|^{-1};$$

2) ортогонализируется вектор  $\mathbf{H}(k-s+2)$  и  $\bar{\mathbf{H}}(1)$ , затем нормируется и т.д.

$$\beta(ik) = \mathbf{H}^T(k-s+i) \bar{\mathbf{H}}(k);$$

$$\bar{\mathbf{H}}_i = \left( \mathbf{H}(k-s+i) - \sum_{k=1}^{i-1} \beta(ik) \bar{\mathbf{H}}(k) \right) \times \left\| \mathbf{H}(k-s+i) - \sum_{k=1}^{i-1} \beta(ik) \bar{\mathbf{H}}(k) \right\|^{-1}.$$

Элементы матрицы  $i$  определяются по формуле

$$\gamma(ij) = \begin{cases} 0 & \text{при } i < j; \\ \frac{1}{\left\| \mathbf{H}(k-s+i) - \sum_{k=1}^{i-1} \beta(ik) \bar{\mathbf{H}}(k) \right\|}} & \text{при } i = j; \\ \frac{\sum_{k=1}^{i-1} \beta(ik) \gamma(ki)}{\left\| \mathbf{H}(k-s+i) - \sum_{k=1}^{i-1} \beta(ik) \bar{\mathbf{H}}(k) \right\|}} & \text{при } i = j. \end{cases}$$

Алгоритм может быть записан и в терминах матриц проецирования. Из приведенных выше соотношений следует, что алгоритм строится по следующей схеме:

$$1) \quad \bar{\mathbf{H}}(k-s+1) = \frac{\mathbf{H}(k-s+1)}{\|\mathbf{H}(k-s+1)\|};$$

$$\mathbf{P}^{(1)}(k-s+1) = \bar{\mathbf{H}}(k-s+1) \bar{\mathbf{H}}^T(k-s+1);$$

$$2) \quad \bar{\mathbf{H}}(k-s+2) = \frac{(\mathbf{I} - \mathbf{P}^{(1)}(k-s+1)) \mathbf{H}(k-s+2)}{\|(\mathbf{I} - \mathbf{P}^{(1)}(k-s+1)) \mathbf{H}(k-s+2)\|};$$

$$\mathbf{P}^{(1)}(k-s+2) = \bar{\mathbf{H}}(k-s+2) \bar{\mathbf{H}}^T(k-s+2);$$

$$3) \quad \bar{\mathbf{H}}(k-s+3) = \frac{(\mathbf{I} - \mathbf{P}^{(1)}(k-s+1) - \mathbf{P}^{(1)}(k-s+2)) \mathbf{H}(k-s+3)}{\|(\mathbf{I} - \mathbf{P}^{(1)}(k-s+1) - \mathbf{P}^{(1)}(k-s+2)) \mathbf{H}(k-s+3)\|};$$

$$\mathbf{P}^{(1)}(k-s+3) = \bar{\mathbf{H}}(k-s+3) \bar{\mathbf{H}}^T(k-s+3);$$

$$s) \quad \bar{\mathbf{H}}(k) = \frac{\left( \mathbf{I} - \sum_{i=1}^{s-1} \mathbf{P}^{(1)}(k-s+i) \right) \mathbf{H}(k)}{\left\| \left( \mathbf{I} - \sum_{i=1}^{s-1} \mathbf{P}^{(1)}(k-s+i) \right) \mathbf{H}(k) \right\|};$$

$$\mathbf{P}^{(1)}(k) = \bar{\mathbf{H}}(k) \bar{\mathbf{H}}^T(k),$$

где  $\mathbf{P}^{(1)}(i)$  — проектор на одномерное пространство, заданное вектором  $\mathbf{H}(i)$ .

Отсюда видно, что очередной вектор  $\mathbf{H}(i)$  получается из исходного  $\mathbf{H}(k-s+i)$  как его нормированная проекция на ортогональное дополнение к подпространству уже построенных  $(i-1)$  векторов. Однако, как отмечается в [2], такой способ построения ортонормированных векторов очень чувствителен к ошибкам округления. Поэтому для повышения численной устойчивости следует использовать следующий модифицированный метод Грама-Шмидта, в котором на каждом шаге вычисляется только одна проекция:

$$1) \quad \bar{\mathbf{H}}(k-s+1) = \frac{\mathbf{H}(k-s+1)}{\|\mathbf{H}(k-s+1)\|};$$

$$\mathbf{P}^{(1)}(k-s+1) = \bar{\mathbf{H}}(k-s+1) \bar{\mathbf{H}}^T(k-s+1);$$

$$\mathbf{H}^{(1)}(k-s+i) = (\mathbf{I} - \mathbf{P}^{(1)}(k-s+1)) \mathbf{H}(k-s+i) \quad (i=2,3,\dots,s);$$

$$2) \quad \bar{\mathbf{H}}(k-s+2) = \frac{(\mathbf{I} - \mathbf{P}^{(1)}(k-s+1)) \mathbf{H}(k-s+2)}{\|(\mathbf{I} - \mathbf{P}^{(1)}(k-s+1)) \mathbf{H}(k-s+2)\|};$$

$$\mathbf{P}^{(1)}(k-s+2) = \bar{\mathbf{H}}(k-s+2) \bar{\mathbf{H}}^T(k-s+2);$$

$$\mathbf{H}^{(2)}(k-s+i) = (\mathbf{I} - \mathbf{P}^{(1)}(k-s+2)) (\mathbf{I} - \mathbf{P}^{(1)}(k-s+1)) \mathbf{H}(k-s+i) \quad (i=3,4,\dots,s);$$

$$s) \quad \bar{\mathbf{H}}(k) = \frac{\prod_{j=1}^{s-1} (\mathbf{I} - \mathbf{P}^{(1)}(k-s+j)) \mathbf{H}(k)}{\left\| \prod_{j=1}^{s-1} (\mathbf{I} - \mathbf{P}^{(1)}(k-s+j)) \mathbf{H}(k) \right\|}.$$

Как отмечается в [2], численные свойства модифицированного метода ортогонализации Грама-Шмидта сходны со свойствами алгоритма Хаусхолдера, однако для своей реализации этот метод требует больше памяти. Кроме того, число арифметических итераций в методе Грама-Шмидта несколько больше, так как в нем все операции производятся над векторами длины  $N$ , в то время как в методе Хаусхолдера столбцы последовательно укорачиваются. По этой же причине программы, необходимые для реализации метода Грама-Шмидта, требуют больше памяти, чем программы Хаусхолдера, так как нет удобного способа получать треугольную матрицу с единичными диагональными элементами на том месте, где хранилась исходная матрица.

Для повышения эффективности преобразований могут быть разработаны специальные схемы последовательного накопления строк или группы строк матрицы данных, однако сложность вычислений при

этом возрастает. Как например, в методе сопряженных градиентов [7] или в методе Форсатта [8]). Таким образом, наиболее эффективным способом повышения устойчивости алгоритма обучения является применение преобразования Хаусхолдера.

### Выводы

С целью улучшения вычислительных свойств процедур обучения разработаны их факторизованные формы, основанные на преобразованиях Холесского, Хаусхолдера и ортогонализации Грамма-Шмидта. Проведенный анализ их свойств показал, что наиболее эффективным способом повышения устойчивости алгоритма обучения является применение преобразования Хаусхолдера.

### Список литературы:

- [1] *Браммер К.*, Зиффлинг Г. Фильтр Калмана-Бьюси / Пер. с нем. – М.: Наука, 1982. – 200 с.
- [2] *Лоусон И.*, Хенсон Р. Численное решение задач метода наименьших квадратов / Пер. с англ. – М.: Наука, 1986. – 232 с.
- [3] *Bierman J.* Factorization methods for discrete sequential estimation – N.Y.: Academic press, 1977. – 241 p.
- [4] *Householder A.S.* The theory of matrices in numerical analysis. – N.Y.: Blasedell Publ. Co., 1964. – 236 p.
- [5] *Изерман Р.* Цифровые системы управления / Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 541 с.
- [6] *Себер Дж.* Линейный регрессионный анализ / Пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 456 с.
- [7] *Поляк Б.Т.* Введение в оптимизацию. – М.: Наука, 1983. – 384 с.
- [8] *Forsythe G.E.* Today's methods of linear algebra // SIAM Rev. – 1967. – Vol.9. – P.489-515.

*Поступила в редколлегию 06.04.2020*



**І.Ю. Шубін<sup>1</sup>, Г.Г. Четвериков<sup>2</sup>, О.С. Ашурова<sup>3</sup>, С.Г. Літвін<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Кандидат технічних наук, професор кафедри програмної інженерії,  
Харківський національний університет радіоелектроніки,  
igor.shubin@nure.ua, ORCID iD: 0000-0002-1073-023X

<sup>2</sup>Доктор технічних наук, професор кафедри програмної інженерії,  
Харківський національний університет радіоелектроніки,  
grirorij.chetverykov@nure.ua, ORCID iD: 0000-0001-5293-5842

<sup>3</sup>Аспірант кафедри програмної інженерії,  
Харківський національний університет радіоелектроніки,  
olga.ashurova@nure.ua, ORCID iD: 0000-0001-8899-5804

<sup>4</sup>Науковий співробітник НДЦ інтегрованих радіоелектронних систем і технологій,  
Харківський національний університет радіоелектроніки,  
riit.kharkiv.ua@gmail.com ORCID iD: 0000-0002-7183-6345

## **ИНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СКЛАДНИХ ОБ'ЄКТІВ**

Сучасний етап розвитку науки і техніки характеризується, насамперед, поширенням, з одночасною конвергенцією поміж собою «високих технологій»: нано-, біо-, інформаційних та когнітивних. Цей факт визначає стійку тенденцію до збільшення високотехнологічних проєктів на базі зазначених технологій. В даних умовах вельми актуальною постає задача формування, з одного боку, такої команди співробітників, рівень компетентності якої надасть змогу забезпечити ефективне виконання високотехнологічних проєктів, а з іншого – здійснити раціональний розподіл людських ресурсів з метою ефективної реалізації всього портфелю проєктів. Людський капітал, як основа інтелектуального капіталу ІТ-компанії є складним об'єктом оскільки характеризується багатьма параметрами (кваліфікація, рівень компетентності, творчі здібності, креативний спосіб мислення тощо), що дозволяють ІТ-компанії створювати високотехнологічні проєкти. Задля оцінки параметрів складних об'єктів необхідно використовувати поєднання різних методів оцінювання, а саме, методів кваліметрії (оцінки якості), методів класифікації, евристичних методів, методів декомпозиції та методології управління проєктами. Створення автоматизованої інформаційної системи оцінювання параметрів складних об'єктів для оцінки кадрів ІТ-компанії на прикладі пошуку проєктних менеджерів є актуальною задачею, а зважаючи на складність та багатофакторність рішення необхідно використовувати систему, засновану на знаннях, тобто інтелектуальну інформаційну систему.

**ИНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА, СКЛАДНИЙ ОБ'ЄКТ, ОЦІНЮВАННЯ ПРОФЕСІЙНИХ КАДРІВ, КВАЛІМЕТРИЯ, КЛАСИФІКАЦІЯ**

Современный этап развития науки и техники характеризуется, прежде всего, распространением, с одновременной конвергенцией между собой «высоких технологий»: нано-, био-, информационных и когнитивных. Этот факт определяет устойчивую тенденцию к увеличению высокотехнологических проектов на базе указанных технологий. В данных условиях весьма актуальной становится задача формирования, с одной стороны, такой команды сотрудников, уровень компетентности которой позволит обеспечить эффективное выполнение высокотехнологических проектов, а с другой - осуществить рациональное распределение человеческих ресурсов с целью эффективной реализации всего портфеля проектов. Человеческий капитал, как основа интеллектуального капитала ИТ-компания является сложным объектом поскольку характеризуется многими параметрами (квалификация, компетентность, творческие способности, креативный способ мышления и т.д.), позволяющими ИТ-компаниям создавать высокотехнологические проекты. Для оценки параметров сложных объектов необходимо использовать сочетание различных методов оценки, в частности, методов кваліметрії (оценки качества), методов классификации, эвристических методов, методов декомпозиции и методологии управления проектами. Создание автоматизированной информационной системы оценивания параметров сложных объектов для оценки кадров ИТ-компания на примере поиска проектных менеджеров является актуальной задачей, а учитывая сложность и многофакторность решения необходимо использовать систему, основанную на знаниях, то есть интеллектуальную информационную систему.

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА, СЛОЖНЫЙ ОБЪЕКТ, ОЦЕНИВАНИЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КАДРОВ, КВАЛІМЕТРИЯ, КЛАСИФІКАЦІЯ**

The current stage of development of science and technology is characterized, first of all, by the spread, with simultaneous convergence of «high technologies»: nano-, bio-, informational and cognitive. This fact determines a steady trend towards an increase in high-tech projects based on these technologies. In these conditions, the task of forming, on the one hand, such a team of employees, the level of competence of which will ensure the effective implementation of high-tech projects, and on the other hand, to carry out a rational distribution of human resources in order to effectively implement the entire portfolio of projects, becomes very urgent. Human capital, as the basis of the intellectual capital

of an IT company, is a complex object because it is characterized by many parameters (qualifications, competence, creativity, creative way of thinking, etc.) that allow an IT company to create high-tech projects. To assess the parameters of complex objects, it is necessary to use a combination of various assessment methods, in particular, qualimetry (quality assessment) methods, classification methods, heuristic methods, decomposition methods and project management methodology. The creation of an automated information system for evaluating the parameters of complex objects for assessing the personnel of an IT company using the example of finding project managers is an urgent task, and given the complexity and multifactorial nature of the solution, it is necessary to use a knowledge-based system, that is, an intelligent information system.

INTELLIGENT SYSTEM, COMPLEX OBJECT, PROFESSIONAL STAFF ASSESSMENT, QUALIMETRY, CLASSIFICATION

### Вступ

У новому тисячолітті базою зростання економіки в розвинених країнах стали високі технології. Такий напрям розвитку вимагає залучення нових ресурсів, підвищує попит на результати науково-технічної діяльності, інвестиції, інформацію і кадри, що відповідають вимогам високих технологій.

У світовій економіці спостерігається стале зростання частки високотехнологічної продукції у ВВП, який у розвинутих країнах становить на сьогодні 10-15%.

У відповідності до РМІ РМВОК [1], управління людськими ресурсами входить до основних галузей знань, а набір команди проекту є одним з головних етапів управління людськими ресурсами.

Витяги з міжнародних та національних стандартів, які наведено нижче, ілюструють важливість питань людських ресурсів.

Розділ 6.2 ДСТУ ISO 9001:2009 (ISO 9001:2008) «Людські ресурси» [2]. Персонал, залучений до роботи, які впливають на відповідність продукції вимогам до неї, повинен бути компетентним, тобто мати належні освіти, професійну підготовленість, навички та досвід. Організація повинна: визначати необхідний рівень компетентності для персоналу залученого до робіт, які впливають на відповідність продукції вимогам до неї; якщо це можливо, забезпечувати проведення навчання або вживати інших заходів для досягнення потрібної компетентності; оцінювати результативність ужитих заходів; забезпечувати обізнаність персоналу щодо доцільності та важливості своєї діяльності та щодо свого в досягнення цілей у сфері якості; вести відповідні записи стосовно освіти, професійної підготовленості, навичок і досвіду.

Підрозділ 7.1.2 ISO 9001:2015 «Людські ресурси». Організація повинна визначати і виділяти персонал, необхідний для результативного впровадження системи менеджменту якості, а також виконання її процесами [2].

Розділ 6.2 ДСТУ ISO 9001-2001 «Людські ресурси». Персонал, залучений до робіт, що впливають на якість продукції, повинен бути компетентним, тобто мати належні освіти, професійну підготовку, кваліфікацію та досвід.

Підрозділ 6.2.1 ISO 9004:2000 «Залучення працівників». Керівництво повинне поліпшувати резуль-

тативність та ефективність діяльності організації, зокрема системи управління якістю, залучаючи та підтримуючи працівників.

Підрозділ 6.2.2.1 ISO 9004:2000 «Компетентність». Керівництво повинне забезпечувати необхідні рівні компетентності для ефективного та результативного функціонування організації. Воно повинне передбачати аналізування фактичних та очікуваних потреб щодо компетентності порівняно з рівнями компетентності, які вже існують в організації.

Підрозділ 6.2.2.2 ISO 9004:2000 «Обізнаність і підготовка». Під час планування потреб у загальній та професійній підготовці слід враховувати зміни, викликані характером процесів, застосовуваних в організації, етапами підвищення кваліфікації працівників, та культури організації. Це дає змогу забезпечити працівників знаннями та уміннями, які, разом із досвідом, підвищуватимуть їхню компетентність.

Підбір кадрів в українських ІТ-компаніях здійснюється шляхом проведення співбесід з кандидатами та їх професійного тестування. Якість підбору персоналу та обсяги даної роботи можна суттєво збільшити за рахунок використання інформаційних технологій в цьому процесі. В Інтернеті існує інформація про дуже велику кількість фахівців в галузі ІТ. Для того, щоб обробляти інформацію про потрібні кадри, необхідна інформаційна система, яка може оцінювати потенційні кадри та їх класифікувати [3].

Зважаючи на те, що інформація про потрібні кадри в галузі ІТ в силу своєї різноманітності та багатогранності являє собою складний об'єкт, оцінка його параметрів характеризується:

- високим рівнем невизначеності в наслідок унікальності кожного претендента на посаду;
- гетерогенністю здібностей та властивостей характеру здобувача;
- дефіцитом часу на прийняття рішення;
- великою розмірністю.

В зазначених умовах з цією задачею може впоратися інтелектуальна система.

Для представлення інтелектуальної системи оцінювання параметрів складних об'єктів можна застосувати математичну модель на прикладі системи оцінювання проектних менеджерів ІТ-компанії.

## 1. Математична модель системи оцінювання проектних менеджерів ІТ-компанії

У рамках розробки моделі оцінювання проектних менеджерів ІТ-компанії запропоновано, що об'єкти представляються у вигляді множини властивостей об'єктів  $S$ . Відзначимо важливу деталь: множина  $S$  є об'єднанням множин, що не перетинаються,  $N$  і  $E$  – відповідно множини чисельних і властивостей таких, що можна перелічити. Кожна властивість  $E_i$ , яку можна перелічити, може визначати значення з певної кінцевої множини значень. Кожна чисельна властивість  $N_i$  може ухвалювати значення, що лежать в області дійсних чисел, обмеженої мінімальним і максимальним межами  $N_{imin}$   $N_{imax}$ , відповідно. Уведення такого розподілу дає можливість системі врахувати як кількісні (чисельні), так і якісні (такі, що можна перелічити) характеристики об'єкта [4].

Завдання, що розв'язуються інтелектуальною системою, діляться на два види: завдання кваліметрії (оцінки якості) і класифікації (розпізнавання образів). У процесі розв'язку завдання кваліметрії кожному оцінюваному об'єкту ставиться у відповідність число  $I$ , що є оцінкою даного об'єкта. У процесі розв'язку завдання класифікації кожному об'єкту ставиться у відповідність найменування класу, до якого ставиться даний об'єкт.

У рамках конкретного завдання оцінювання, до оцінюваних об'єктів пред'являються вимоги з множини  $T$ , а також встановлюються відповідності  $F$  між властивостями й вимогами. При цьому одна вимога може посилатися на кілька властивостей. Взагалі, зміст введення вимог, як інструмента, використовуваного для адекватної оцінки об'єкта, полягає в наступному: вимоги виражають мету суб'єкта оцінки при розв'язку конкретного оцінного завдання; властивості ж, будучи описом, представленням об'єкта оцінки, існують незалежно від розв'язуваного завдання. Конкретне значення властивості одержують лише з погляду системи вимог, пред'явленої суб'єктом оцінки.

Крім того, у завданні класифікації формується множина класів  $C$ . У завданні кваліметрії кожній вимозі з множини  $T$  ставиться у відповідність вага (значимість) цієї вимоги. У завданні класифікації кожній вимозі ставляться у відповідність  $n$  ваг, де  $n$  – кількість класів. У цьому випадку  $P_{ij}$  – це вага (значимість)  $i$ -ї вимоги з множини  $T$  в  $j$ -му класі з множини  $C$ . А вся множина  $P$  називається множиною ваг (вагових коефіцієнтів). Крім того, у завданні кваліметрії для кожного елемента з множини  $F$  – відповідностей вимоги й залежних від нього властивостей завдається так званий дуговий ваговий коефіцієнт, значення якого визначає значимість конкретної властивості в рамках конкретної вимоги.

Наприклад, при оцінці комп'ютерів вимозі «швидкодія» відповідають властивості: «тип процесора»,

«тактова частота» і «тип системної шини». При цьому тип процесора, наприклад, вносить у швидкодію комп'ютера більший внесок, ніж тип системної шини. Відповідно дуговий коефіцієнт властивості «тип процесора» у рамках вимоги «швидкодія» буде більше, ніж коефіцієнт властивості «тип системної шини» у рамках тієї ж вимоги, через те, що тип процесора вносить більший вклад у швидкодію системи, ніж тип системної шини. При розв'язку завдання класифікації кожному елементу множини  $F$  ставляться у відповідність  $n$  коефіцієнтів, де  $n$  – кількість класів, що визначають значимість властивості в межах даної вимоги для даного класу з множини  $C$ . Отримана в такий спосіб множина  $D$  називається множиною дугових вагових коефіцієнтів [4].

Після формулювання множини вимог можна говорити про формування множини еталонів  $E$ . Еталон як ідеал може в дійсності не існувати, але для ухвалення рішення він повинен бути завданий. Причому, у рамках описуваної моделі еталон не ідентичний поняттю «еталон» у загальноприйнятому сенсі цього слова. Еталон з погляду моделі не тільки несе інформацію про ідеальне значення тієї або іншої властивості, але й про те, на скільки всі інші значення даної властивості «гарні» з погляду пред'явлених вимог до об'єкта оцінки. Елементом  $E_i$  множини  $E$  є функція  $V=f_i(S_i)$ . Ця функція виражає те, наскільки конкретне значення властивості  $S_i$  задовольняє завданню (підвищує оцінку) [5]. Значення цієї функції лежать у межах нуля й одиниці. Якщо значення функції дорівнює одиниці, то значення властивості повністю задовольняє завданню й підвищує загальну оцінку об'єкта у відповідність із вагою цієї властивості в рамках пов'язаних з ним вимог і вимог рівня моделі (тобто з урахуванням дугових коефіцієнтів і вагових коефіцієнтів). Навпаки, якщо значення функції дорівнює нулю, то дане значення не задовольняє даному завданню й властивість не вносить внеску в загальну оцінку об'єкта. Вочевидь, що дана функція безперервна, якщо властивість  $S_i$  чисельна й має  $n$  значень, якщо властивість  $S_i$  така, що можна перелічити (де  $n$  – кількість результатів  $i$ -ї властивості). Для підвищення ефективності оцінювання, в модель вводиться бінарний вектор критичності  $K$ . Якщо значення елемента вектора критичності  $K_{ij}$  дорівнює 1, то  $j$ -а властивість критична в  $i$ -ї вимозі. Це означає, що якщо значення  $j$ -ї властивості конкретного об'єкта має в рамках завдання міру виразності рівну 0, то об'єкт свідомо одержує найнижчу оцінку. Вектор критичності вносить у модель елемент логіки предикатів, оскільки дозволяє відітнути об'єкти, що свідомо не задовольняють умовам завдання.

Таким чином, у завданні кваліметрії оцінна модель являє собою кортеж:

$$M \langle S, T, P, D, E, F, K \rangle, \text{ а в завданні класифікації: } \\ M \langle S, T, P, D, E, C, F, K \rangle.$$

Вищеописаних даних достатньо для ухвалення рішення поставленого оцінного завдання (класифікації або кваліметрії) [6]. Причому в такій моделі існують можливості для досить точного аналізу ухваленого рішення й гнучкого настроювання системи. Безсумнівною перевагою моделі є її універсальність. Дійсно, модель, сформульована таким чином, інваріантна до предметної галузі, переліку властивостей і іншим обмежуючим умовам.

Структури даних повинні бути як внутрішніми (придатними для використання іншими програмними модулями інтелектуальної системи) так і зовнішніми (придатними для зберігання на зовнішніх носіях). Крім того, необхідно розробити механізми формування й модифікації зазначених структур даних для настроювання системи на розв'язок конкретного оцінного завдання, а також механізми, що забезпечують одержання інформації іншими програмними модулями (наприклад, модулями оцінки й ухвалення рішення). Механізми керування даними повинні бути представлені у вигляді програмних модулів (підпрограм, класів, ресурсів), що реалізують структури даних і алгоритми [7].

Проектування інтелектуальної системи оцінки проектних менеджерів ІТ-компанії починається зі складання її структурної моделі [8]. При виділенні структурних компонентів програми, керуються наступними вимогами до елементів: відносна самостійність, істотність для процесу в цілому, стійке розрізнення [8]. Зв'язки між структурними складовими сусідніх рівнів зображують у вигляді дуг графа.

Представляється доцільним об'єднати множини  $T$ ,  $D$ ,  $P$ ,  $K$  і множину відповідностей  $F$  в одну структуру даних, оскільки ці множини логічно зв'язані між собою (існування множин  $P$  і  $D$  впливає зі змісту й формулювання множини  $T$ ). Крім того, об'єднання цих множин надасть можливість сполучити параметри  $P$  і  $F$  (якщо відсутня відповідність між  $i$ -ю вимогою й  $j$ -ю властивістю, то вага  $P_{ij} = 0$ ).

Для того щоб зв'язати всі ці файли разом, необхідна структура даних, що зберігає інформацію про самий проект у цілому ( про тип розв'язуваного завдання, про імена файлів і т.д.) [9].

Тому логічні структури повинні сполучати переваги структур з послідовним доступом і структур з випадковим доступом. Причому, дані структури повинні зберігати інформацію, що записана у файлах-компонентах системи й надавати її на вимогу інших програмних модулів. Для структуризації опису доцільно поділити реалізовані функції на рівні. При цьому функції першого рівня викликаються безпосередньо при обробці того або іншого повідомлення головного вікна програмного додатка. Функції другого рівня викликаються функціями першого рівня і т.д. [10].

Опис основних алгоритмів керування даними. Після формулювання уявлення інформації у вигляді структур фізичних даних можна перейти до проектування алгоритмів керування цими структурами. Спочатку сформулюємо: які дії повинна дозволити робити система з погляду користувача по настроюванню на розв'язок конкретного оцінного завдання. Система повинна дозволити:

- створювати опис конкретного оцінного завдання і усіх її компонентів;
- настроюватися на розв'язок раніше сформульованого завдання;
- видаляти інформацію про завдання, якщо в ній відпала необхідність;
- модифікувати усі складові частини проекту, що несуть інформацію про компоненти оцінної моделі, тобто модифікувати уявлення множин  $S$ ,  $T$ ,  $P$ ,  $E$ ,  $D$ ,  $C$ ,  $K$  і відповідностей  $F$ ;
- здійснювати збереження зроблених змін з наданням можливості користувачеві продублювати інформацію.

З погляду програмного інтерфейсу, проектовані алгоритми повинні:

- надавати інформацію про всі компоненти моделі іншим програмним модулям системи;
- зберігати в пам'яті інформацію про імена файлів-компонентів проекту для можливості їх запису на диск або читання з диска;
- зберігати й дозволити динамічно (з інших підсистем) змінювати інформацію про стан проекту.

Таким чином, система повинна постійно контролювати коректність сформованих компонентів моделі й залежно від цього дозволити або не дозволити робити ті або інші дії. Наприклад, не можна дозволити робити оцінювання, доки не сформовані еталони й не можна дозволити формувати еталони, доки не сформовані множини вимог і вагових коефіцієнтів.

Підсистеми фактично є автоматизованими робочими місцями різних категорій користувачів. Так адміністратор системи повинен користуватися підсистемою настроювання й адаптації, підсистемою керування мережею проектів і підсистемою керування БД [11]. Експерти-фахівці в предметній галузі повинні користуватися підсистемами навчання й, можливо, підсистемами настроювання й адаптації, а також підсистемами керування БД. Особа, що ухвалює рішення (керівник), як правило, користується тільки підсистемою прийняття й аналізу розв'язків. Рядові оператори забезпечують внесення вихідних даних у базу і є основними користувачами підсистеми керування базою даних. На даній підставі пропонується реалізувати проектовану інтелектуальну систему у вигляді наступних п'яти автоматизованих робочих місць:

АРМ адміністратора – підсистема настроювання й адаптації;

- АРМ оператора – підсистема керування базами даних;
- АРМ менеджера – підсистема прийняття й аналізу розв’язків;
- АРМ експерта – підсистема навчання;
- АРМ когнітолога – підсистема керування мережею проектів.

Таким чином, розв’язано актуальну задачу розробки інформаційної системи для оцінки кадрів ІТ-компанії на прикладі оцінки проектних менеджерів та застосування процесів управління проектом згідно з методологією SCRUM [12].

Запропонована математична модель системи оцінки проектних менеджерів ІТ-компанії може бути використана для представлення в інтелектуальній системі оцінювання параметрів складних об’єктів.

### Моделювання інтелектуальної системи оцінювання параметрів складних об’єктів

Використовуючи математичну модель системи оцінювання проектних менеджерів ІТ-компанії було розроблено спеціальні засоби в формі моделей процесів та взаємозв’язків для майбутнього проектування інтелектуальної системи оцінювання параметрів складних об’єктів (рис. 1, рис. 2).

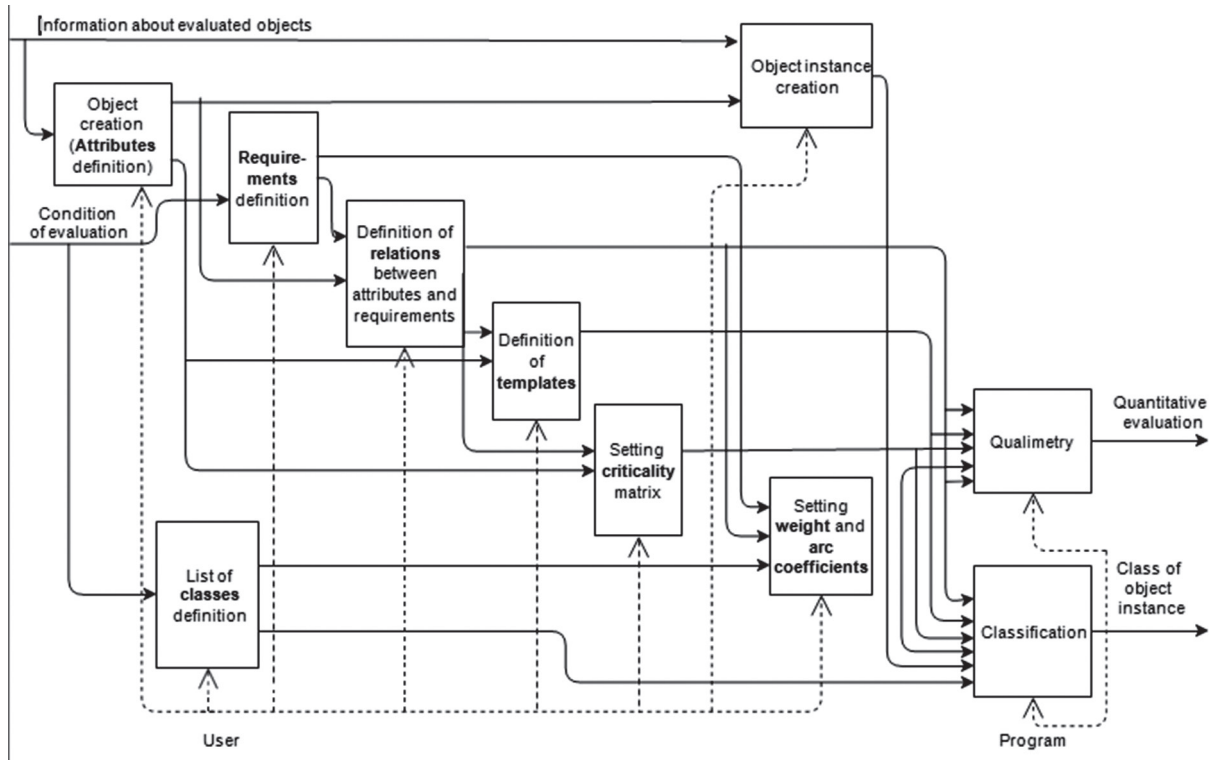


Рис. 1. Діаграма декомпозиції IDEF0 «Процес оцінювання параметрів складних об’єктів»

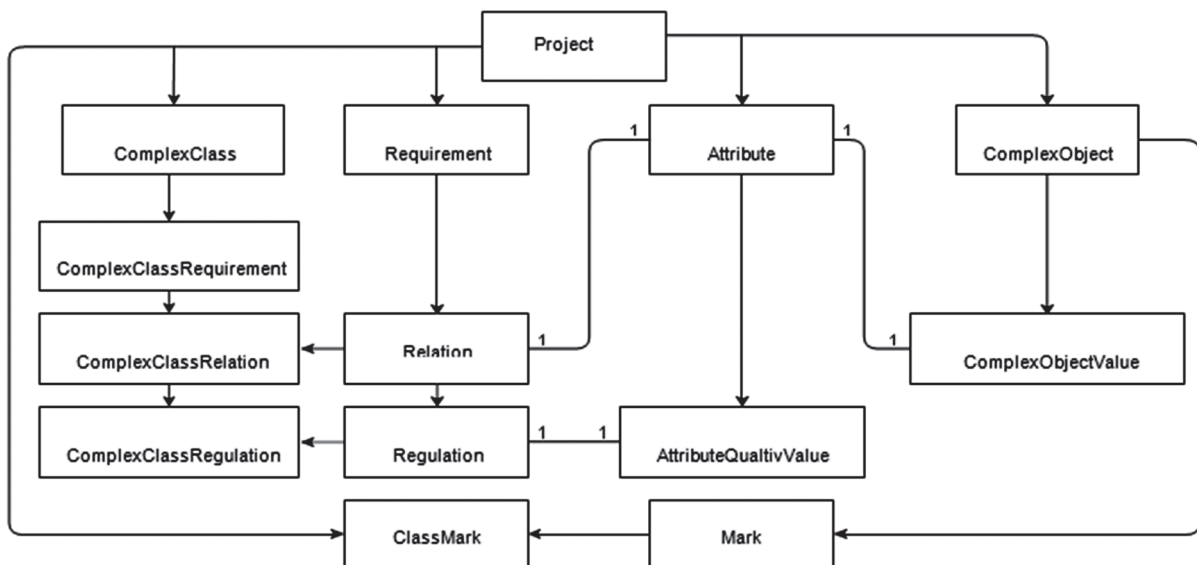


Рис. 2. Модель інтелектуальної системи оцінювання параметрів складних об’єктів

**Висновки**

З метою ефективної реалізації високотехнологічних проектів розроблено модель інтелектуальної системи оцінювання параметрів складних об'єктів на основі математичної моделі системи оцінювання проектних менеджерів ІТ-компанії

Завдання, що розв'язує інтелектуальна система базується на таких методах оцінювання, як кваліметрія (оцінка якості) і класифікація (розпізнавання образів), що дозволить підвищити ефективності діяльності ІТ-компанії при оцінюванні такого складного об'єкту, як людський капітал.

Результати дослідження можуть знайти практичне застосування при проектуванні та розробці інтелектуальної системи оцінювання параметрів складних об'єктів завдяки якій ІТ-компанії зможуть знаходити відповідні кадри та формувати команди співробітників, рівень компетентності яких надасть змогу забезпечити ефективне виконання високотехнологічних проектів.

**Список літератури:**

- [1] Шостак О. І. Розробка підходу до формування експертних комісій щодо оцінювання складу команд виконавців високотехнологічних проектів // Технологический аудит и резервы производства. 2016. Т. 4, № 2 (30). С. 20–25.
- [2] A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide). – 5th ed. – Project Management Institute, 2013. – 616 p.
- [3] Васильєва В.Г. Інформаційна технологія оцінки проектних менеджерів ІТ-компаній / А.Д. Козирев, І.Ю. Шубін // Міжнародна науково-практична конференція «Математичне моделювання процесів в економіці та управлінні проектами і програмами (ММП-2019)», Коблево, 2019 р. Праці – Харків: ХНУРЕ, 2019. – 151с.
- [4] Івашко В.Г., Фін В.К. Експертні системи й деякі проблеми їх інтелектуалізації // Семіотика й інформатика. – 1986. – Вып. 27. – С.25-61.
- [5] Chetverikov G.G., Vechirska I.D., Tanyanskiy S.S. The methods of algebra finite predicates in the intellectual system of complex calculations of telecommunication companies// International Conference Proceedings Crimean Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo).-2014, 6959425. – pp. 346-347
- [6] Chetverikov G.G., Vechirska I.D., Leshchinsky V.A. Mathematical modeling and design of multiple-valued logic elements of digital telecommunications networks // International Conference Proceedings Crimean Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo). – 2014, 6959429. – pp. 354-355.
- [7] Кук М.Н., Макдональд Дж. Формальна методологія набуття й представлення експертних знань. ТИИЭР. – Т. 74, N 10. – 1986. – С.145-155.
- [8] Представление и использование знаний / Під ред. Х. Уэно, М.Исидзука. – М.: Мир,1989. 220 с.
- [9] Cohen M.A., Grossberg S. Absolute stability of global pattern formation and parallel memory storage by competitive neural networks//IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. 2016. V. 13. N 5. P. 815 – 826.
- [10] Хоггер К. Введение в логичне програмування. - М. Мир, 1988. – 348с.
- [11] Chetverikov G., Puzik O., Vechirska I. Multiple-valued structures of intellectual systems //Proceedings of the with Internations Computer Sciences and Information Technologies (CSIT). 2016, 7589907. – pp. 204-207.
- [12] A Guide to the SCRUM BODY OF KNOWLEDGE (SBOK™ GUIDE)// Електронний ресурс// URL: <https://www.scrumstudy.com/SBOK/SCRUMstudy-SBOK-Guide-3rd.pdf>.

*Надійшла до редколегії 22.04.2020*

УДК 621.3.01+621.38

DOI 10.30837/bi.2020.1(94).06

П.С. Клімушин<sup>1</sup>, Т.П. Колісник<sup>2</sup>, О.Ф. Лановий<sup>3</sup>, М.О. Можасв<sup>4</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., доцент, кафедра інформаційних технологій та кібербезпеки ХНУВС,  
м. Харків, Україна, klimushyn@ukr.net, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1020-9399>;

<sup>2</sup>к.п.н., доцент, кафедра інформаційних технологій та кібербезпеки ХНУВС,  
м. Харків, Україна, ktp201505@gmail.com, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7442-8136>;

<sup>3</sup>к.т.н., доцент, кафедра програмної інженерії ХНУРЕ, заступник декана факультету КН,  
м. Харків, Україна, oleksiy.lanovyy@nure.ua, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4504-4301>;

<sup>4</sup>к.т.н., доцент, кафедра інформаційних технологій та кібербезпеки ХНУВС,  
м. Харків, Україна, mikhail.mozhayev@hniise.gov.ua  
, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1566-9260>

## ДОСЛІДЖЕННЯ СЕРЕДОВИЩ МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОПРОЦЕСОРНИХ СИСТЕМ НА МІКРОКОНТРОЛЕРАХ З ДОДАТКОВИМИ МОДУЛЯМИ КРИПТОГРАФІЧНОГО ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ

Сфера застосування захищених мікропроцесорних систем складається з забезпечення функцій інформаційної безпеки: автентифікації суб'єктів і об'єктів інформаційної взаємодії, шифрування інформації, контролю цілісності, управління доступом, управління ключами. Сьогодні актуальним завданням є проектування мікропроцесорних систем з додатковими функціями криптографічного захисту інформації з допомогою використання різних програмних середовищ комп'ютерного моделювання. В роботі проаналізовано найбільш ефективні та доступні програми комп'ютерного моделювання мікропроцесорних систем та надано практичні рекомендації щодо їх використання. Показано, що найбільш потужною системою автоматизованого проектування вважається програмний пакет Proteus, який дозволяє змоделювати роботу різних мікропроцесорних пристроїв з підтримкою декількох сімейств мікроконтролерів від різних виробників. До основних переваг відносяться: виконання всіх етапів розробки в єдиному середовищі; можливість написання, налагодження і тестування мікропрограмного забезпечення, генерування діагностичних повідомлень з пошуку помилки програмування. Використання Multisim в навчальному процесі дає можливість: переглядати і змінювати стан вмісту регістрів, пам'яті програм і даних, осередків стека і біта конфігурації; візуалізувати результат виконання окремої команди або програми в цілому; демонструвати практику спільного застосування мов C і Асемблер в одному проекті з метою оптимізації програми; вивчати основи роботи і особливості функціонування периферійних пристроїв. Проте обмежений набір мікроконтролерів в програмі Multisim накладає суттєві обмеження на можливість її використання при розробці реальних проектів. Програма комп'ютерного моделювання TINA має значно простіший русифікований інтерфейс у порівнянні з Proteus VSM з можливістю укладення всієї інформації про створений проект в одному файлі. У порівнянні з Multisim бібліотека TINA містить значно більше моделей мікроконтролерів, а вбудований програматор дозволяє модифікувати програми та спостерігати результати. Можливість використання безкоштовної версії TINA-TI та наявність онлайн-версії TINACloud з використанням хмарних технологій робить цю програму дуже корисною для освіти. Веб-сервіс пропонує безліч освітніх ресурсів і можливість виконання дослідження з проектування мікропроцесорних систем.

МОДЕЛЮВАННЯ, МІКРОКОНТРОЛЕРИ, МІКРОПРОЦЕСОРНА СИСТЕМА, КРИПТОГРАФІЧНИЙ ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ, PROTEUS, MULTISIM, TINA

Сфера применения защищенных микропроцессорных систем служит для обеспечения функций информационной безопасности: аутентификации субъектов и объектов информационного взаимодействия, шифрование информации, контроля целостности, управления доступом, управления ключами. Сегодня актуальной задачей является определение защищенности микропроцессорных систем с помощью использования различных программных сред компьютерного моделирования. В работе проанализированы наиболее эффективные и доступные программы компьютерного моделирования микропроцессорных систем и даны практические рекомендации по их использованию. Показано, что наиболее мощной системой автоматизированного проектирования является программный пакет Proteus, который позволяет смоделировать работу различных микропроцессорных устройств с поддержкой нескольких семейств микроконтроллеров от разных производителей. К основным преимуществам относятся: выполнение всех этапов разработки в единой среде; возможность написания, отладки и тестирования микропрограммного обеспечения, генерирования диагностических сообщений по поиску ошибки программирования. Использование Multisim в учебном процессе дает возможность: просматривать и изменять состояние содержимого регистров, памяти программ и данных, ячеек стека и бита конфигурации; визуализировать результат выполнения отдельной команды или программы в целом; демонстрировать практику совместного применения языков C и Ассемблер в одном проекте с целью оптимизации программы; изучать основы работы и особенности функционирования периферийных устройств. Однако ограниченный набор микроконтроллеров в программе Multisim накладывает существенные ограничения на использование ее при разработке реальных проектов. Программа компьютерного моделирования TINA имеет простой русифицированный интерфейс по сравнению с Proteus с возможностью

заключення всей інформації о створеному проекті в одному файлі. По порівнянню з Multisim бібліотека TINA містить значно більше моделей мікроконтролерів, а вбудований програматор дозволяє модифікувати програми та спостерігати результати. Можливість використання безкоштовної версії TINA-TI та наявність онлайн-версії TINACloud з використанням хмарних технологій робить цю програму дуже корисною для освіти. Веб-сервіс надає багато освітніх ресурсів та можливість виконання досліджень по проектуванню мікропроцесорних систем.

**МОДЕЛЮВАННЯ, МІКРОКОНТРОЛЕРИ, МІКРОПРОЦЕСОРНА СИСТЕМА, КРИПТОГРАФІЧНА ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ, PROTEUS, MULTISIM, TINA**

The field of application of the protected microprocessor systems includes information security functions: authentication of subjects and objects of information interaction, information encryption, integrity control, access control, key management. Today, the urgent task is to establish the security of microprocessor-based systems using a variety of computer simulation software environments. The work analyzes the most effective and affordable computer simulation programs for microprocessor systems and gives practical recommendations for their use. It has been shown that the most powerful computer-aided design system is the Proteus software suite which allows simulating the operation of various microprocessor devices with support for several microcontroller families from different manufacturers. The main advantages include: performing all stages of development in a single environment; the ability to write, debug, and test firmware, generate diagnostic messages to find programming errors. Using Multisim in the educational process makes it possible to: review and change the status of the register content, program memory and data, stack cells and bit configuration; visualize the result of the execution of a single command or a program as a whole; demonstrate the practice of joint use of languages C and Assembler in one project in order to optimize the program; to study the basics of operation and features of peripheral devices functioning. However, the limited set of microcontrollers in the Multisim program imposes significant restrictions on the possibility of using it for development of real projects. The computer simulation program TINA has a russified interface that is much easier compared to the Proteus with an ability to enter all the information about the created project into one file. Compared to Multisim, the TINA library contains significantly more microcontroller models, and the built-in programmer allows modifying programs and observing the results. Being able to use the free version of TINA-TI and having an online version of TINACloud using cloud technologies makes this program very useful for education. Web service offers many educational resources and the ability to perform research on the design of microprocessor systems.

**MODELING, MICROCONTROLLERS, MICROPROCESSOR SYSTEM, CRYPTOGRAPHIC INFORMATION PROTECTION, PROTEUS, MULTISIM, TINA**

### Вступ

Сучасну мікроелектроніку важко уявити без такої важливої складової, як мікроконтролери (МК). Мікроконтролерні технології дуже ефективні, так як один і те ж пристрій, який раніше збирався на традиційних елементах, будучи зібраний з застосуванням мікроконтролерів, стає простішим. Крім того, із застосуванням мікроконтролерів з'являються практично безмежні можливості по додаванню нових споживчих функцій, а також забезпечення безпеки їх функціонування. Досить просто поміняти програму або мікропрограму.

Моделювання в електроніці зводиться до вирішення групи задач синтезу і задач аналізу. При цьому під синтезом розуміють створення якогось варіанта схеми, не обов'язково остаточного. До задач аналізу входить вивчення властивостей схеми за заданою в результаті синтезу її структури, характеру вхідних компонентів і їх параметрів. В процесі модулювання синтез як задача може виконуватися багато разів, чергуючись з вирішенням задач аналізу.

Становлення Інтернет речей є однією з основних причин трансформації ринку мікропроцесорних систем в напрямку розробки захищених інтелектуальних систем, об'єднаних в єдину глобальну обчислювальну мережу. Для забезпечення зростаючих потреб ринку актуальним завданням є визначення найбільш ефективних середовищ проектування мікропроцесорних

систем на мікроконтролерах з додатковими модулями криптографічного захисту інформації.

Оскільки Інтернет речей привносить мережевий інтелект у фізичні речі навколо нас, особливо гостро постає питання безпеки. Життя сучасної людини залежить від транспортної, промислової, комунальної, цивільної та медичної інфраструктури, незаконне маніпулювання якими може привести до трагічних наслідків. Не менш важливим є захист приватного життя і персональних даних, доступ до яких зловмисники можуть отримати через злам систем промислово-побутової автоматизації, моніторингу, безпеки і контролю доступу, мобільної та домашньої електроніки тощо. Пристрої Інтернет речей можуть бути не лише об'єктом атаки, але і суб'єктом, наприклад, IoT-ботнети використовуються зловмисниками для організації DDoS-атак, поширення вірусів тощо. Проблеми пов'язані з безпекою, що є основними стримуючими факторами впровадження технологій Інтернет речей.

В Інтернеті захист даних від несанкціонованого доступу і збереження інформацією своїх основних властивостей (конфіденційність, автентичність та цілісність) реалізується криптографічними методами, такими як шифрування та хешування. Разом з тим для вироблення ключів та векторів ініціалізації необхідні генератори випадкових чисел.

Під захищеними криптографічними мікроконтролерами розуміються спеціалізовані напівпровідникові

пристрої, що мають на кристалі, крім стандартного процесорного ядра, додаткові апаратні блоки — криптографічні акселератори. Такі апаратні акселератори необхідні для значного прискорення виконання складних криптографічних операцій — генерації випадкових чисел, шифрування і розшифрування, формування і перевірки електронного підпису тощо.

Сфера застосування захищених мікропроцесорних систем складається з забезпечення функцій інформаційної безпеки: автентифікації суб'єктів і об'єктів інформаційної взаємодії, шифрування інформації, контролю цілісності, управління доступом, управління ключами [1].

Одним з найбільш популярних наборів мікроконтролерів, які застосовуються в системах оброблення даних, контролю і управління та захисту інформації є пристрої, що випускаються фірмою Microchip та відомі під абревіатурою PIC. Наряду з цим, останнім часом корпорація Atmel (США) стала виробляти набір мікросхем на ядрі AVR, яке має більш досконалу архітектуру й забезпечує МК цього набору високу швидкодію та низьке енергоспоживання, що дає їм відчутну перевагу, порівняно з контролерами PIC. До того ж, цінова політика корпорації Atmel є більш привабливою для розробників таких систем. Порівняно з пристроями PIC, МК AVR мають більш розвинену систему команд, що налічує до 133 інструкцій, а flash-пам'ять програм має можливість внутрішньосхемного програмування. Архітектура ядра AVR оптимізована так, що дозволяє використовувати мову високого рівня C.

Для задач, у яких вимоги до захисту інформації особливо високі — смарт-карти, електронна комерція, автентифікація користувачів, шифрування даних, фірма Atmel пропонує спеціалізовані мікроконтролери — зокрема, сім'ї SecureAVR, які поєднують звичайне AVR-ядро з додатковими модулями для підтримки криптографічних операцій та підвищення фізичної захищеності мікросхем до різного роду атак. Отже, застосування мікроконтролерів AVR забезпечує додаткові переваги спеціалістам з інформаційної безпеки.

Застосування комп'ютерного моделювання для проектування мікропроцесорних систем з додатковими функціями криптографічного захисту інформації є непростю задачею, яка вимагає предметного дослідження.

Сьогодні в світовій практиці застосовується широкий спектр програмних середовищ комп'ютерного моделювання. До них, перш за все, слід віднести такі програми як Proteus VSM, NI Multisim, TINA.

Приклади використання програм комп'ютерного моделювання електронних схем в своїх наукових працях надають вітчизняні та закордонні автори: Совин Я.Р., Наконечний Ю.М., Опірський І.Р., Стахів М.Ю.

[1] — аналізують моделювання можливих загроз інформаційної безпеки в системах з використанням мікроконтролерів; Алехин В.А. [2,3] — визначає розвиток навчальних комплексів з моделювання по електротехніці, електроніці та мікроконтролерам в середовище TINA; Березняков С.В., Греков А.В. [4], Матвєенко І.П. [5] та Филатов М. [6] — надають приклади моделювання мікроконтролерів в системі моделювання Proteus; Макаренко В., Бабко А. [7], Найдено Е.В. [8] та Колесникова Т. [9], Квашнін В.О., Бабаш А.В., Квашнін В.В. [10] — визначають елементи моделювання роботи мікроконтролерів у програмі Multisim; Ляшенко О, Журіло О. [11] та багато інших.

В цілому аналіз цих робіт показує, що проблема використання програмних середовищ моделювання мікропроцесорних систем досконально ще ні досліджена і має мінливий характер в залежності від етапів їх розвитку та кон'юнктури ринку мікроконтролерів.

Обираючи інструментальні засоби моделювання, доцільно брати до уваги: підтримку можливо більшої кількості мікроконтролерів; різноманітність вбудованих інтерфейсів (RS-232, IEEE1284/LPT, USB) та додаткових компонентів, що розширюють функціональні можливості проектування мікропроцесорних систем.

Метою дослідження є визначення найбільш ефективних та доступних програм комп'ютерного моделювання мікропроцесорних систем та надання практичних рекомендацій щодо їх застосування.

### 1. Дослідження системи проектування Proteus

Аналіз наукових праць свідчить, що найбільш потужною системою автоматизованого проектування вважається програмний пакет Proteus VSM, який дозволяє змоделювати роботу різних мікропроцесорних пристроїв. Програма Proteus VSM є симулятором наскрізного проектування, що має на увазі створення мікропроцесорної системи, починаючи з графічного зображення і закінчуючи виготовленням друкованої плати пристрою.

Proteus VSM складається з двох самостійних програм: ISIS — програма синтезу та моделювання безпосередньо електронних схем і ARES — програма розробки друкованих плат. Крім того, до складу восьмої версії входить інтегроване середовище розробки VSM Studio, що містить у собі текстовий редактор з підсвічуванням синтаксису, компілятор асемблера, симулятор, налагоджувач й інтерфейс із апаратними емуляторами та дозволяє швидко написати програму для мікроконтролера, використовуюваного в проекті, і здійснити її компіляцію [4].

При розробці програмного забезпечення мікроконтролерів необхідно звернути увагу на безкоштовні програмні засоби (AVR Studio, WinAVR) підтримки

проектування та налагодження систем на мікроконтролерах AVR, робота з якими економить гроші та забезпечує ліцензовану чистоту кінцевого програмного продукту.

Останнім часом усе популярніше стає використання компіляторів мов високого рівня при написанні програм для МК. Найбільше поширення при цьому одержали компілятори мови C з можливістю оптимізації коду, оскільки в цій мові найбільш просто реалізуються всі необхідні можливості з керування апаратними засобами МК. Крім C при розробці програмного забезпечення для МК застосовуються й інші мови високого рівня. Так, для МК сімейства AVR існують також компілятори мов Basic, Pascal і Forth.

Proteus підтримує наступні етапи розробки: розробка схеми електричної принципової (введення в графічному редакторі); моделювання схеми з використанням різноманітних віртуальних приладів; розробка друкованої плати, включаючи 3D-візуалізацію її збірки.

В Proteus реалізовані такі можливості налагодження мікропрограмного забезпечення: спільне моделювання роботи мікроконтролера, виконуючого задану програму, і оточуючих його аналогової і цифрової схем; широкі налагоджувальні можливості, в т.ч. доступ до вмісту регістрів і пам'яті, завдання точок зупинки програми, покрокове виконання; налагодження на рівні вихідного коду (C, Бейсік, Асемблер, в залежності від типу використовуваного для налагодження файлу з випробовуваним мікропрограмним забезпеченням); підтримка декількох сімейств мікроконтролерів від різних виробників, в т.ч.: PIC12, PIC16, PIC18 і PIC24 (Microchip); 8051/8052, в т.ч. похідні від них, що випускаються Philips і Atmel; AVR, Tiny AVR і Mega AVR (Atmel); ARM7, в т.ч. LPC2000 (NXP); HC11 (Freescale) і мікроконтролерні модулі BASIC Stamp (Parallax); ведеться робота по додаванню підтримки інших МК.

До переваг використання Proteus відносяться: виконання всіх етапів розробки електронного пристрою на основі мікроконтролера в єдиному середовищі; можливість написання, налагодження і тестування мікропрограмного забезпечення, ще до фізичного виготовлення дослідного зразка системи; генерування діагностичних повідомлень (наприклад, при виконанні непередбачуваної інструкції) як з боку процесорного управління, так і з боку моделей пристроїв введення-виведення, що дозволяє виявити складні в пошуку помилки програмування; прискорення процесу розробки електронного пристрою; підтримка спільної роботи з апаратними пристроями, що підключені через порт комп'ютера.

Є демонстраційна версія яку можна використовувати для навчальних закладів з обмеженням (рис. 1):

неможливість збереження проекту та його друку; неможливість створення своїх власних схем на основі МК, проте після відкриття існуючих схем є можливість змінити програму, виконувану мікроконтролером, і поспостерігати результат її виконання.

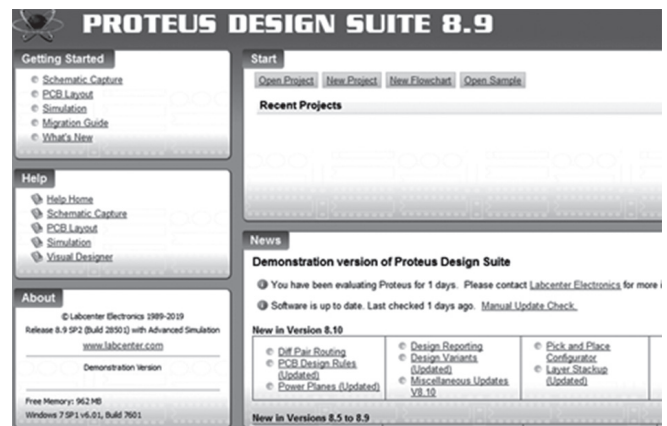


Рис. 1. Стартова сторінка демоверсії Proteus

Таким чином, використовуючи інтегровану середу AVR Studio і демонстраційну версію програми Proteus, з'являється можливість досить легко, з найменшими матеріальними і тимчасовими витратами, спроектувати мікропроцесорну систему, що включає будь-який мікроконтролер, провести її налагодження і розводку плати і тільки потім створювати реальний пристрій [5, 6].

## 2. Дослідження середовища моделювання NI Multisim

Традиційно в лабораторних практикумах вузів застосовують програми Electronics Workbench і Multisim компанії National Instruments (NI). Програма NI Multisim має простий наочний інтерфейс, потужні засоби графічного аналізу результатів моделювання, наявність віртуальних вимірювальних приладів, які копіюють реальні аналоги.

Крім того, NI Multisim дозволяє перетворити будь-яку електричну схему в простий процес, з можливістю додати будь-який елемент в схему. Версія NI Multisim Student Edition призначена для навчальних закладів і включає в себе навчальні курси, підготовлені апаратні рішення і робочі підручники (рис. 2). Однак ця версія також вимагає придбання ліцензійного програмного забезпечення.

Програмне середовище NI Multisim 14 містить програмний модуль MCU, що дозволяє моделювати програмовані цифрові пристрої на основі восьмирозрядних мікроконтролерів MCS-51 і PIC-16 фірми Microchip, а також компілятори з мови C і Асемблер зазначених мікроконтролерів. Ці мікроконтролери мають традиційну архітектуру, загальну систему команд і розширені периферійні функції, що дозволяє широко застосовувати їх в світовому

мікропроцесорному ринку завдяки оптимального поєднання ціни і можливостей.

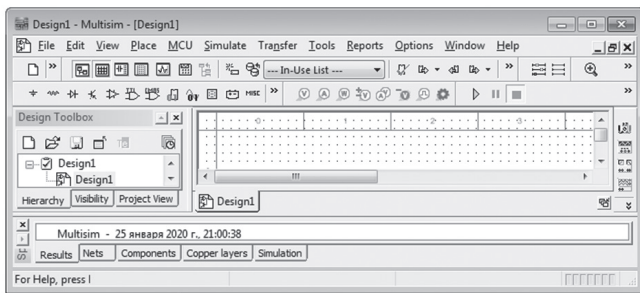


Рис. 2. Стартова сторінка Multisim Student Edition

Використання Multisim в навчальному процесі дає можливість [8]:

- переглядати і змінювати стан вмісту регістрів, пам'яті програм і даних, осередків стека і біта конфігурації, що сприяє розумінню і кращому засвоєнню принципів роботи і архітектури мікроконтролерів;
- візуалізувати результат виконання окремої команди або програми в цілому, підвищуючи наочність викладеного матеріалу;
- наводити приклади практичного застосування, активізуючи інтерес до дисципліни;
- демонструвати практику спільного застосування мов С і Асемблер в одному проекті з метою оптимізації програми;
- вивчати основи роботи і особливості функціонування периферійних пристроїв, використовуючи їх моделі з бази даних Multisim;
- коригувати зміст навчального матеріалу з урахуванням особливостей аудиторії.

Бібліотека Multisim містить групу електромеханічних моделей, що дає можливість вводити в лабораторний практикум міжпредметних компонент і створювати комплексні лабораторні роботи і приклади демонстраційних схем при наскрізному інформаційному навчанні з суміжних дисциплін одночасно, що істотно підвищує ефективність засвоєння матеріалу, що викладається.

З огляду простоти і зручності використання Multisim є найбільш прийнятним засобом для освоєння основних прийомів проектування мікропроцесорних систем. Застосування Multisim в процесі навчання сприяє підвищенню якості освіти та виробленню необхідних професійно-схемотехнічних компетентностей, а також дає можливість рекомендувати його для розробки курсу інтерактивного навчання.

Проте обмежений набір мікроконтролерів в програмі NI Multisim накладає суттєві обмеження на можливість її використання при розробці реальних проектів. З вищевикладеного можна зробити висновки про те, що використовувати програму NI Multisim доцільно на етапі навчання програмування мікроконтролерів на мові С або Асемблер. Всі

необхідні для налагодження засоби встановлюються автоматично при інсталяції NI Multisim або є їх дистрибутивні, що знаходяться в папці з встановленою програмою і у користувача немає необхідності пошуку і встановлення додаткового програмного забезпечення. А на сьогоднішній день, мабуть, найкращою програмою для моделювання мікроконтролерів при вивченні їх можливостей і розробки пристроїв з їх застосуванням є Proteus. [7].

### 3. Дослідження програмного середовища TINA

В останні роки з'явилася нова ефективна програма комп'ютерного моделювання TINA, яка містить інтегровану частину для проектування друкованих плат, має значно простіший інтерфейс у порівнянні з Proteus VSM, який легко освоюється студентами. Крім того, вся інформація про створений проект укладена в одному файлі, який можна переслати і відкрити на іншому комп'ютері для продовження моделювання або перевірки роботи студентів. Наряду з цим, програма має русифікований інтерфейс, що значно підвищує ефективність засвоєння навчального матеріалу (рис. 3).

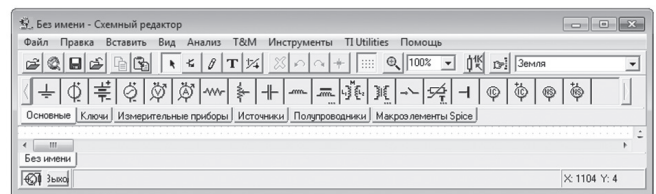


Рис. 3. Стартова сторінка програми TINA

Програма розробляється спільними зусиллями співробітників компаній Texas Instruments і DesignSoft. TINA є потужним інструментом для моделювання електронних схем та мікроконтролерів, дозволяє проводити дослідження схем при зміні параметрів, оптимізації, виконувати частотний і спектральний аналіз, досліджувати перехідні характеристики тощо. У порівнянні з Multisim бібліотека TINA містить значно більше моделей мікроконтролерів — більше 1000, які можна програмувати на Асемблері і на мові С, моделювати, налагоджувати в змішаних схемах. Вбудований програматор дозволяє модифікувати програми та спостерігати результати.

Можливість використання безкоштовної і досить ефективної версії TINA-TI робить цю програму дуже корисною для освіти. Наряду з цим, для мобільного навчання компанія DesignSoft пропонує новий програмний продукт TINACloud [12], який використовує хмарні інтернет-технології і може запускатися через браузер на вашому пристрої. Це багатомовна онлайн-версія популярного програмного забезпечення TINA, на яку можна підписатися за частку ціни TINA (студентська ліцензія на рік 12 євро). Цей сервіс пропонує безліч освітніх ресурсів і можливість виконання

віртуального дослідження і лабораторного практикуму по мікропроцесорній техніці.

Аналіз результатів робіт професора Алехина В. А. показує високу ефективність використання програм TINA та TINACloud в початковому процесі. Ефективність цієї програми підтверджує створений автором навчальний комплекс з електротехніки, електроніки та мікроконтролерів [2, 3].

При застосуванні програми TINA в налагодженні завдань програмування та інтерактивного моделювання пристроїв на мікроконтролерах доцільно вибрати популярні мікроконтролери PIC16F84A і PIC16F877A компанії Microchip Technology Incorporated, так як Microchip надає безкоштовну інтегровану програмну середовище розробки мікроконтролерів MPLAB IDE, яка дозволяє писати, налагоджувати, оптимізувати текст програми, включає в себе редактор тексту, симулятор і менеджер проєктів, підтримує роботу емуляторів, програматорів і інших налагоджувальних засобів. Щоб полегшити програмування на C поєднання мікроконтролерів з зовнішніми периферійними пристроями, доцільно використовувати середовище mikroC PRO for PIC v.6.5.0 компанії MikroElektronika, яка також є безкоштовною при умовах HEX-файлу проєкту менш 2кбайт, що є достатнім в навчальних завданнях.

### Висновки

На підставі проведеного дослідження можна відзначити чітку тенденцію щодо апаратної підтримки криптографічних операцій та підвищення фізичної захищеності мікросхем до різного роду атак.

Використання захищених криптографічних мікроконтролерів дає змогу підняти швидкість шифрування AES в 10-20 разів для 8/16-бітових МК та до 150 разів для 32-бітових МК порівняно з програмними реалізаціями алгоритму. Зростання швидкості обчислення хеш-алгоритмів SHA-1, SHA-256 у 32-бітових МК становить більше ніж в 100 разів, а для криптографічних хеш-алгоритмів HMAC наближається до 500.

У 32-бітових мікроконтролерах спостерігається тренд до впровадження комплексних рішень безпеки, які б не тільки пришвидшували широке коло симетричних і асиметричних алгоритмів і протоколів, але і надавали можливість захищеного зберігання та генерування ключів, безпечного завантаження і оновлення коду, підтримки електронних підписів та сертифікатів [1].

Основними засобами забезпечення безпеки є програмне або апаратне використання симетричних криптоалгоритмів і криптографічних хеш-функцій, застосування електронних підписів, розвивається використання асиметричних криптоалгоритмів.

Складністю для захисту мікроконтролерів є їх обмеженість в ресурсах процесора і доступної пам'яті за сучасними мірками. Підлаштовуючи апаратну частину для максимальної оптимізації обчислювальних витрат, обсягу пам'яті і споживання енергії, на вільних обчислювальних потужностях можливе використання симетричних (AES, 3DES — підтримуються апаратно в Atmel AVR XMEGA) і асиметричних криптоалгоритмів (RSA, DH, ECC), обчислення контрольної суми (CRC підтримується апаратно в мікроконтролерах сімейства Atmel AVR XMEGA), використання криптографічних хеш-функцій, комбінація вищевказаних методів [10].

В дослідженні було визначено, що для моделювання мікропроцесорних систем на мікроконтролерах з додатковими модулями криптографічного захисту інформації доцільно використовувати наступні програми: Proteus VSM, NI Multisim, TINA.

Порівняльний аналіз цих програм комп'ютерного моделювання з точки зору їх доступності, простоти освоєння й ефективності застосування викладачами і студентами в навчальному процесі засвідчив.

Найбільш потужною системою автоматизованого проєктування вважається програмний пакет Proteus VSM, який дозволяє змоделювати роботу різних мікропроцесорних пристроїв з підтримкою декількох сімейств мікроконтролерів від різних виробників.

До основних переваг відносяться: виконання всіх етапів розробки в єдиному середовищі; можливість написання, налагодження і тестування мікропрограмного забезпечення, генерування діагностичних повідомлень з пошуку помилки програмування; прискорення процесу розробки мікропроцесорного пристрою; підтримка спільної роботи з апаратними пристроями, що підключені через порт комп'ютера.

Використання Multisim в навчальному процесі дає можливість: переглядати і змінювати стан вмісту регістрів, пам'яті програм і даних, осередків стека і біта конфігурації; візуалізувати результат виконання окремої команди або програми в цілому; демонструвати практику спільного застосування мов C і Асемблер в одному проєкті з метою оптимізації програми; вивчати основи роботи і особливості функціонування периферійних пристроїв. Проте обмежений набір мікроконтролерів в програмі Multisim накладає суттєві обмеження на можливість її використання при розробці реальних проєктів.

Програма комп'ютерного моделювання TINA має значно простіший русифікований інтерфейс у порівнянні з Proteus VSM з можливістю укладення всієї інформації про створений проєкт в одному файлі. У порівнянні з Multisim бібліотека TINA містить значно більше моделей мікроконтролерів, а будований програматор дозволяє модифікувати програми та спостерігати результати.

Можливість використання безкоштовної версії TINA-TI та наявність онлайн-версії TINACloud з використанням хмарних технологій робить цю програму дуже корисною для освіти. Веб-сервіс пропонує безліч освітніх ресурсів і надає можливість виконання дослідження з проектування мікропроцесорних систем.

#### Список літератури:

- [1] *Совин Я.Р.*, Наконечний Ю.М., Опірський І.Р., Стахів М.Ю. Аналіз апаратної підтримки криптографії у пристроях Інтернету речей. *Ukrainian Scientific Journal of Information Security*, 2018, vol. 24, issue 1, p. 36-48.
- [2] *Алехин В.А.* Развитие учебного комплекса по электротехнике, электронике и микроконтроллерам с моделированием в программной среде TINA. *Открытое образование*. 2017. №6. С. 57–69.
- [3] *Алехин В.А.* Электротехника и электроника. Учебные ресурсы для студентов и преподавателей. URL: <http://www.toe-mirea.ru/> (дата звернення 02.02.2020).
- [4] *Березняков С.В.*, Греков А.В. Моделирование микроконтроллера 80C51 в системе схемотехнического моделирования Proteus VSM. *Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2016. № 17. С. 104-120.
- [5] *Матвеев И.П.* Компьютерное моделирование электронных схем на базе микроконтроллеров AVR. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія : Техніка та енергетика АПК*. 2014. Вип. 194(2). С. 39-46.
- [6] *Филатов М.* Работа с микроконтроллерами AVR в программной среде Proteus 8.1. *Компоненты и технологии*. 2015. №12(173). С. 103–112.
- [7] *Макаренко В.*, Бабко А. Моделирование работы микроконтроллеров в программе NI Multisim. *Электронные компоненты и системы*. 2012. №4. С. 38-43.
- [8] *Найденко Е. В.* Применение программной среды NI Multisim при изучении дисциплины «Микропроцессорная техника». *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2017. № 25. С. 465–469.
- [9] *Колесникова Т.* Программирование микроконтроллеров в программной среде NI Circuit Design Suite — Multisim 12.0. *Компоненты и технологии*. 2014. № 6 (155). С. 144–148.
- [10] *Ляшенко О.*, Журіло О. Моделирование возможных угроз информационной безопасности в системах с использованием микроконтроллеров AVR. *Global Cyber Security Forum : материалы первого международного научно-практического форума*, 14–16 листопада 2019 р. Харків: ХНУРЭ, 2019. С. 68–69.
- [11] *Квашнін В. О.*, Бабаш А. В., Квашнін В. В. Програмування та застосування мікроконтролерів STM32F4Discovery: монографія. Краматорськ: ЦТПІ «Друкарський дім», 2017. 143 с.
- [12] TinaCloud. URL: <http://www.tinacloud.com> (дата звернення 02.02.2020).

*Надійшла до редколегії 26.05.2020*



І.Ю. Шубін<sup>1</sup>, А.Д. Козирев<sup>2</sup>, О.В. Галак<sup>3</sup>, Ю.І. Ситник<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Кандидат технічних наук, професор кафедри програмної інженерії,  
Харківський національний університет радіоелектроніки,  
igor.shubin@nure.ua, ORCID ID: 0000-0002-1073-023X

<sup>2</sup> Дослідник кафедри програмної інженерії,  
Харківський національний університет радіоелектроніки,  
andrii.kozyriev@nure.ua, ORCID ID: 0000-0001-6383-5222

<sup>3</sup> Кандидат технічних наук, завідувач кафедри РХБЗ,  
Військовий інститут танкових військ НТУ "ХПІ",  
galak79@gmail.com ORCID ID: 0000-0002-2590-9291

<sup>4</sup> Начальник відділу екологічної безпеки управління  
РХБ захисту Командування Сил підтримки ЗСУ  
veb2006@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4673-5232

## МЕТОДИ СТВОРЕННЯ ІНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ТА АНАЛІЗУ ПОБУДОВИ СКЛАДНИХ ГРАНИЦЬ ТЕРИТОРІЙ

Бурхливий розвиток промисловості в другій половині ХХ століття призвів до різкого збільшення викидів шкідливих речовин в атмосферу, що призвело до необхідності контролю стану навколишнього середовища з метою попередження негативних наслідків забруднення середовища. Особливу актуальність у цьому завданні додав розвиток атомної енергетики в силу можливості виникнення зараження місцевості радіонуклідами в масштабах від промислового майданчика АЕС до декількох регіонів.

Оскільки проблема збереження навколишнього середовища набула міжнародного характеру, одним з головних завдань регіональних органів керування є підвищення рівня екологічної й техногенної безпеки в регіоні, що, насамперед, означає необхідність попередження надзвичайних ситуацій (НС) і зменшення їх матеріальних і соціальних наслідків.

Тому створення ефективних систем екологічного моніторингу повинне передбачати рішення двох проблем – створення ефективних систем інформаційної й інтелектуальної підтримки прийняття рішень і моделювання екологічної обстановки за даними моніторингу.

**АПРОКСИМАЦІЯ, АСОЦІАТИВНІСТЬ, ГІС СИСТЕМА, ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ, ЛОКУС ЗАБРУДНЕННЯ, ІНТЕРЛОКАЦІЯ ЛАГРАНЖА, ФУНКЦІЯ ІНТЕРПОЛЯЦІЇ, R-ФУНКЦІЇ**

Бурное развитие промышленности во второй половине ХХ века привело к резкому увеличению выбросов вредных веществ в атмосферу, что привело к необходимости контроля состояния окружающей среды с целью предупреждения негативных последствий загрязнения среды. Особую актуальность в этой задаче добавило развитие атомной энергетики в силу возможности возникновения заражения местности радионуклидами в масштабах от промышленной площадки АЭС до нескольких регионов.

Поскольку проблема сохранения окружающей среды приобрела международный характер, одной из главных задач региональных органов управления является повышение уровня экологической и техногенной безопасности в регионе, что, прежде всего, означает необходимость предупреждения чрезвычайных ситуаций (ЧС) и уменьшение их материальных и социальных последствий.

Поэтому создание эффективных систем экологического мониторинга должно предусматривать решение двух проблем – создание эффективных систем информационной и интеллектуальной поддержки принятия решений и моделирования экологической обстановки по данным мониторинга

**АППРОКСИМАЦИЯ, АССОЦИАТИВНОСТЬ, ГИС СИСТЕМА, ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ, ЛОКУС ЗАГРЯЗНЕНИЯ, ИНТЕРЛОКАЦИЯ ЛАГРАНЖА, ФУНКЦИЯ ИНТЕРПОЛЯЦИИ, R-ФУНКЦИИ.**

The rapid development of industry in the second half of the twentieth century led to a sharp increase in emissions of harmful substances into the atmosphere, which led to the need to monitor the state of the environment in order to prevent the negative effects of pollution. The development of nuclear energy has become especially relevant in this task due to the possibility of radionuclide contamination of the area on a scale from the industrial site of the NPP to several regions.

As the problem of environmental protection has become international, one of the main tasks of regional governments is to increase the level of environmental and man-made safety in the region, which means, above all, the need to prevent emergencies and reduce their material and social consequences.

Therefore, the creation of effective environmental monitoring systems should provide the solution of two problems – the creation of effective systems of information and intellectual support for decision-making and modeling of the environmental situation based on monitoring data.

**APPROXIMATION, ASSOCIATION, GIS SYSTEM, ENVIRONMENTAL MONITORING, POLLUTION LOCUS, LAGRANGE INTERLOCATION, INTERPOLATION FUNCTION, R-FUNCTIONS**

## Вступ

З тих пір, як почався технічний розвиток у світі, з'явилося високо індустріальне суспільство, людина стала активно втручатися в природу. На сьогоднішній день екологія нашої планети перебуває в стані гострої кризи. Швидкий прогрес науки і техніки, з одного боку, дозволив задовольнити всі потреби людського суспільства, але з іншого боку – погіршив умови його існування.

Головними причинами ситуації, що склалася є: досить тривалий і високий ступінь освоєння території, наявність різноманітного природно-ресурсного потенціалу (мінеральні, водні, земельні, лісові та рекреаційні ресурси), високий рівень індустріального розвитку, найвища в Європі розорювання території, нерациональний і неприпустимо високий ступінь використання мінеральних і лісових ресурсів, високий рівень урбанізації, велика концентрація населення і виробництва в окремих районах, непомірний розвиток енерго- і ресурсномістких галузей, що забруднюють навколишнє середовище, недосконалі технології.

На основі аналізу існуючих завдань екологічного моніторингу показано, що для рішення першої із цих проблем необхідно адаптувати ряд існуючих інформаційних технологій до специфіки завдань цього типу. До основних технологій цього типу відносяться:

- геоінформаційні системи (ГІС), сполучені з інтернет-системами збору даних від стаціонарних і мобільних джерел інформації (спутників, авіаційних систем збору даних, метеорологічних станцій і ін.), які містять електронні карти місцевості, демографічні, метеорологічні й інші дані, використання яких необхідно для одержання адекватних рішень [1-5];

- розподілені бази даних територіальної інформаційно-аналітичної системи, що забезпечують сполучення з відповідною ГІС [6];

- засобу інтелектуального аналізу даних, що забезпечують прийняття рішень за даними екологічного моніторингу [7].

Разом з тим, для рішення власне завдань оцінки екологічної обстановки необхідна розробка нових моделей і методів, орієнтованих на рішення завдань обчислювальної геометрії [8-10] і математичної фізики [11], де виникають проблеми моделювання турбулентного руху в атмосфері [12] й приземному шарі [13].

## 1. Постановка задачі

Досліджуючи процес забруднення навколишнього середовища викидами відходів промислових підприємств, необхідно оцінити вплив шкідливого забруднення на біологічне середовище. Тому важливим завданням у цей час є прогноз зміни екологічних систем під впливом природних і антропогенних факторів [18].

В [14] представлена частина комплексної екологічної моделі, що включає моделі гідротермодинаміки атмосфери, основні й сполучені рівняння переносу й дифузії з урахуванням фотохімічної трансформації

й процесів аерозольного утворення за рахунок коагуляції, а також модель оптимізації потужності джерел, мінімізуючи завдання навколишньому середовищу збиток.

В [15] викладені основні ідеї побудови математичної моделі поширення забруднень в атмосфері з урахуванням вітру, турбулентності, сухого й вологого осадження й перетворення речовин.

Оскільки основні джерела забруднення розташовані в містах, то дуже важливим є вивчення полів атмосферного забруднення міського середовища, а це також і санітарно-гігієнічне завдання, тому що просторовий розподіл забруднюючих речовин у місті тісно пов'язаний з рівнями захворюваності в різних його районах [16].

Актуальною є розробка методів для попереднього обчислення областей можливого розміщення промислових підприємств, житлових зон і зон відпочинку з дотриманням санітарних норм забруднення.

Найбільш широке поширення одержали математичні методи розрахунку полів атмосферного забруднення міського середовища, зокрема, розроблені в Головні геофізичній обсерваторії.

Зокрема, в [12] побудована математична модель поширення забруднень для регіону зі складною формою границі, яка описується рівняннями теорії R-функцій, що дозволяє будувати нормальні рівняння локусів. Застосована інтерлокаційну формулу Лагранжа для побудови функції забруднення з обліком наявних експериментальних даних. Наведені приклади моделювання екологічної обстановки (на прикладі України) за допомогою спеціально розробленої програми.

Математичні моделі й алгоритмічне забезпечення сучасної системи прийняття рішень в аварійній ситуації повинні містити:

- систему ухвалення рішення про факт перед аварійної ситуації або аварії, засновану на порівнянні в реальному масштабі часу інформації екосистеми й еталонних даних;

- систему нагромадження знань про аварії й перед аварійних станах, що необхідно для розвитку експертної системи;

- систему вироблення сценарію ліквідація аварійної ситуації або аварії.

Така система підтримки прийняття рішень може ґрунтуватися на базах знань, що пояснюється необхідністю подолати бар'єр сприйняття людиною. База знань запропонує диспетчерові різні готові сценарії прийняття рішень. Також система підтримки прийняття рішень може бути заснована на спеціальних правилах, на фреймах або на логічних правилах.

ГІС-технологія має унікальні можливості для рішення завдань, пов'язаних з аналізом і прогнозом явищ і подій навколишнього світу, з осмисленням і виділенням головних факторів і причин, а також їх можливих наслідків, із плануванням стратегічних рішень і поточних наслідків, що вживають дій.

На основі проведеного аналізу моделей, методів

і програмних систем, призначених для рішення завдань екологічного моніторингу, а також виникаючих при цьому проблем підготовки рішень, заснованих на використанні ГІС-технологій і територіально-розподілених баз даних, необхідно розробити систему моделей і методів обробки географічної, демографічної й іншої інформації, призначених для виявлення населених пунктів і районів, що піддалися впливу несприятливих факторів, викликаних аваріями, пожежами й аналогічними причинами.

## 2. Опис проведених теоретичних досліджень

### 2.1. Використання геоінформаційних систем для збору даних і прогнозування екологічної обстановки

Основні можливості ГІС, що забезпечують ефективність моделювання екологічної обстановки. Застосування геоінформаційних технологій у керуванні природно-технічним комплексом з метою екологічного моніторингу користується все більшою популярністю серед адміністрації й експлуатаційників. Зустрічаючись із законодавчими обмеженнями й працюючи в конкурентних умовах, ці особи і їх керівники шукають більш ефективні шляхи керування складними проектами. Інтегруючи свої операційні системи — як цифрові, так і звичайні, вони можуть досягти істотних успіхів, особливо в плануванні й на стадіях моніторингу й ліквідації наслідків НС. Деякі з переваг полягають у тому, що [2]:

- використання ГІС моделювання скорочує польові дослідницькі роботи;
- заощаджується час і вартість обговорення проекту;
- прискорюється одержання доходів завдяки більш оперативній ліквідації наслідків НС;
- використовуються сучасні, легко доступні супутникові дані для рішення виникаючих завдань, особливо для великих областей;
- створюються просторові бази даних по навколишньому середовищу й соціально-економічним аспектам, які можна легко обновляти й змінювати, а також спільно використовувати з різними службами МНС;
- скорочується час на створення програм, що включають просторові дані, у порівнянні з використанням більш традиційних методів;
- цифрові просторові дані, використовувані в діалоговому режимі, дуже полегшують вибір траси до місця НС і рішення інших питань;
- при рішенні аварійних ситуацій зменшуються витрати на відшкодування збитків;
- створюються бази даних про власність, що допомагають у рішенні майбутніх перспектив використання.

Оскільки в ГІС графічні об'єкти пов'язані з табличними даними, то як графікові, так і семантику потрібно одночасно й у той же час ефективно обробляти, що ускладнюються й гігантськими обсягами інформації. Стає зрозумілим, що створення гарної ГІС — процес досить непростий, що вимагає значно більших зусиль і використання новаторських рішень.

Приведемо деякі ГІС, які можуть становити інтерес. Найбільше добре себе зарекомендували для роботи із дрібномасштабними «природними» картами такі ГІС, як Arcinfo і Arcview GIS. Обидві системи розроблені американською компанією ESRI і досить поширені у світі. З відносно простих західних ГІС, які починали свій родовід з аналізу території в обсязі, необхідному для бізнесу й щодо простих застосувань, можна назвати систему Mapinfo, яка також поширена у світі досить широко. Ця система дуже швидко прогресує й сьогодні може скласти конкуренцію найрозвиненішим ГІС. Корпорацією Intergraph, що базується на основі Autocad — подібної системи Microstation, що випускається у свою чергу компанією Bentley. Система MGE являє собою ціле сімейство різних програмних продуктів, що допомагають вирішувати найбільш широка безліч завдань, що існують в області геоінформатики.

Autocadlanddesktop, цей програмний продукт має потужні засоби для створення карт і різних планувальних рішень, можливістю створювати й маркувати геодезичні крапки, визначати й редагувати перехрестя й границі доріг, створювати модель тривимірного рельєфу, розраховувати обсяг і контури.

Програма візуалізації Gaswview розроблена НПП ФОРТ-М. Призначена для оглядового перегляду об'ємні зображень дна ріки, берега та ін. Програма написана мовою 3D графіки OpenGL і дозволяє: вибирати будь-який фрагмент акваторії; змінювати масштаби його зображення як по осях, розташованих у горизонтальній площині, так і по вертикальній осі разом з горизонтальною або окремо; розглядати його з різних кутів зору; змінювати розташування джерела світла; змінювати кольори поверхні дна, берегів.

Повторенням концепції Arcinfo, але, що сильно уступає останньої по функціональній повноті, є система Geodraw. Можливості її обмежені в основному дрібномасштабними картами. Очевидно, могутнішою системою є російська ГІС Sinteks ABRIS. В останній добре представлені функції по аналізі просторової інформації.

### 2.2. Інтелектуальний аналіз даних у завданнях екологічного моніторингу

Наявність геоінформаційної системи й розподіленої бази даних територіальної інформаційно-аналітичної системи є необхідним, але недостатньою умовою створення системи регіональної й, тим більше, міжрегіональної системи екологічного моніторингу.

Для комплексного вирішення проблем керування великомасштабною системою доцільно використовувати інтелектуальне інтегроване середовище, що поєднує засоби інтелектуального аналізу даних [17] і геоінформаційну систему.

Інтелектуальний аналіз даних (ІАД) — це новий напрямок в області інформаційних систем. Його метою є виявлення схованих закономірностей і правил у надвеликих масивах різномірних даних і можливість їх застосування для рішення завдань підтримки

прийняття рішень. Цей процес складається із трьох основних етапів:

- дослідження (виявлення закономірностей, рідше невідомих взаємозв'язків);
- використання виявлених закономірностей для побудови моделей;
- аналіз виключень для виявлення й пояснення відхилень у знайдених закономірностях.

Отримані відомості перетворюються до інформації, яка характеризується як знання й надалі його можна застосувати до нових даних. Знаходження нового знання засобами ІАД — напрямок, який використовує методи штучного інтелекту, математики й статистики.

Сфера застосування ІАД не обмежена — вона скрізь, де існують які-небудь дані: в економіці, охороні здоров'я, страхуванні, торгівлі, у різних областях, пов'язаних з контролем і прогнозуванням стану складних динамічних систем, що особливо важливо при екологічному моніторингу. Методи ІАД використовуються при рішенні таких завдань, як обслуговування кредитних карток, медична діагностика, аналіз споживчого ринку, прогнозування обсягу продажів і керування закупівлями, керування цінами й виробництвом, оцінка нерухомості, прогнозування споживання енергії, дослідження факторів попиту й багатьох інших.

Статистичні методи обробки даних є першим напрямком розвитку засобів ІАД. Їх можна підрозділити на наступні розділи:

- попередній аналіз природи статистичних даних;
- виявлення закономірностей і взаємозв'язків;
- багатомірний статистичний аналіз;
- динамічні моделі й прогноз на основі тимчасових рядів.

У статистичних методах більш послідовно розглядається значимість більших масивів даних для рішення завдання навчання автоматизованих СППР. Найбільш відомі наступні пакети: SAS, STATISTICA, SPSS, SCENARIO, SYSTAT та ін.

### 2.3. Моделювання границь забруднення екологічної обстановки

При моделюванні екологічної обстановки в регіонах зі складною формою границі й найбільш значимими джерелами забруднення будемо використовувати нормальні рівняння креслень,  $R$  — рівнозначність і інтерлокаційну формулу Лагранжа. Форму границі регіону, у якій будемо проводити дослідження екологічної обстановки, апроксимуємо за допомогою певної кількості відрізків, обраного експериментально з умов швидкодії виконуваного завдання й одержуваного результату, і представимо замкненої ламаної.

Нормальне рівняння замкненої ламаної з вершинами в точках  $M_1(x_1, y_1)$ ,  $M_2(x_2, y_2)$ , ...,  $M_n(x_n, y_n)$ , запишемо в такий спосіб:

$$f(x, y) \equiv \sum_{i=1}^{n-1} \phi(x, y, x_i, y_i, x_{i+1}, y_{i+1}) \sim \phi(x, y, x_n, y_n, x_1, y_1)$$

Завдяки асоціативності операції рівнозначності, ми можемо включати в загальну побудову функцію границі регіону нормальні функції ділянок границі в довільній послідовності. При цьому буде досягатися ефект симетрії картини регіону, якщо форма й граничні умови мають цей же тип симетрії.

За допомогою даного підходу побудоване рівняння границі України  $\omega_{\text{України}} = 0$ . При цьому використано 310 відрізків прямих [12]. Функціональне відображення границі України єдиним аналітичним вираженням дозволяє надалі включати його (або рівняння ділянок границі) у розв'язний алгоритм.

При побудові функції забруднення регіону доцільно використовувати інтерлокаційну формулу:

$$u(x, y) = u_0 + u_1 = \sum_{i=1}^n \omega_i + \left( \sum_{i=1}^n \phi_i \right) \Phi$$

де  $\omega_i(x, y) = 0$  — рівняння  $i$ -го джерела з відомим рівнем забруднення.

$\Phi$  — невизначений компонент, що входить у залишковий член. Вона може апроксимуватися деяким поліномом з невизначеними коефіцієнтами, що перебувають із умови мінімуму функціонала (якщо він відомий) на безлічі функцій, що ухвалюють задані значення елементів на локусах, якими є області джерел забруднення.

У роботі [12] була проведена оцінка стану забруднення атмосферного повітря в містах України за даними спостережень, які проводилися в 54 містах на 167 стаціонарних постах. Найбільше забруднення повітря спостерігалось в Донецьку, Макіївці, Одесі, Дніпропетровську, Дзержинську, Маріуполі, Дніпродзержинську, Харкову, Запоріжжі, Луцьку, Краматорську, Єнакієве, Горлівці, Львову. Визначався зміст в атмосфері 39 забруднюючих речовин, включаючи важкі метали. Основний обсяг визначень (близько 60%) ставився до найпоширеніших речовин: пил, двоокис сірки, окис вуглецю, двоокис азоту.

У такий спосіб доведено, що для побудови математичної моделі поширення забруднень у регіоні зі складною формою границі можна скористатися рівняннями теорії  $R$ -Функцій, що дозволяють будувати нормальні рівняння локусів. При цьому можливо застосування інтерлокаційну формули для побудови функції забруднення з обліком наявних експериментальних даних, а також розширення розв'язуваної проблеми на основі внесення в неї нових даних, наприклад, обліку наявності вітру, характеру загасання функції рівня забруднення й ін.

## 3. Опис розроблених моделей обробки геоінформаційної інформації

### 3.1. Моделі й методи рішення завдання локалізації точки

Завдання локалізації точки, або завдання про перевірку приналежності точки деякої області, виникають, наприклад, коли необхідно перевірити, що

деякий населений пункт попадає (або не попадає) у зону впливу факторів поразки, коли ця зона задається деякою областю. Відповідно до прийнятої полігональної моделі місцевості вважаємо, що всяка область задається, що не має само-перетинів замкненої ламаної (простої ламаної). При цьому вважаємо, що розглянуті планарні підрозбивки такі, що після видалення із площини границь областей відкриті безлічі, що залишаються, зв'язні. Це потрібно для того, щоб пари точок, що належать одній області, можна було з'єднати кривою, що не містить граничних крапок області.

Перший крок – рішення завдання, коли площина розбита на дві області, одна з яких нескінченна, а інша є багатокутником  $P$ . Очевидно, що  $P$  – простий багатокутник; це випливає з умови розбивки площини на дві області й з теореми Жордана для багатокутників.

Наступний етап – визначення приналежності багатокутнику. Дано простий багатокутник  $P$  і точка  $z$ ; визначити, чи перебуває  $z$  усередині  $P$ . Трудомісткість цього завдання залежить від того, чи має  $P$  крім простоти ще які-небудь властивості. Інтуїтивно опуклий багатокутник виглядає більш простим об'єктом. Тому розглядається завдання приналежності опуклому багатокутнику. Дані опуклий багатокутник  $P$  і точка  $z$ . Чи перебуває  $z$  усередині  $P$ ? Рішення цього завдання для випадку унікального запиту сформульоване нижче, причому цей результат буде слушний і для неопуклих багатокутників.

Приналежність точки  $z$  внутрішній області простого  $N$ -Косинця  $P$  можна встановити за час  $O(N)$  без попередньої обробки.

Доказ цього твердження визначає наступний алгоритм. Проведемо через точку  $z$  горизонталь  $l$ . По теоремі Жордана зовнішня й внутрішня області  $P$  добре визначені. Якщо  $l$  не перетинає  $P$ , то  $z$  – зовнішня точка. Тому нехай  $l$  перетинає  $P$ , і розглянемо спочатку випадок, коли  $l$  не проходить ні через одну з вершин  $P$ . Нехай  $L$  – число точок перетинання  $l$  із границею  $P$  ліворуч від  $z$ . Оскільки  $P$  обмежений, лівий кінець лежить поза  $P$ . Будемо рухатися уздовж  $l$  від – праворуч аж до  $z$ . На самому лівому перетинанні  $l$  із границею  $P$  ми потрапимо усередину  $P$ , на наступному перетинанні вийдемо назовні і т. д. Тому  $z$  лежить усередині тоді й тільки тоді, коли  $L$  непарне. У неоднозначному випадку, коли  $l$  проходить через вершини  $P$ , нескінченно малий поворот  $l$  навколо  $z$  проти годинникової стрілки не змінить класифікації (усередині/поза) точки  $z$ , але усуне неоднозначність.

У випадку, коли розглядається опуклий багатокутник, розрахунки спрощуються завдяки наступному твердженню – промінь, що виходить із внутрішньої крапки обмеженою опуклою фігурою  $F$ , перетинає границю  $F$  у точності в одній точці.

Важливе значення для наступного також представляє завдання, коли дано три точки  $p, p', p''$ . Потрібно визначити, чи перебуває точка  $p$  ліворуч або праворуч або на орієнтованому відрізку  $p'p''$ .

### 3.2. Моделі й методи рішення завдань побудови опуклої оболонки

Побудова опуклої оболонки для довільної безлічі точок є однією з фундаментальних завдань обчислювальної геометрії й має більшу практичну значимість; як правило, опукла оболонка, як аналог, що обгинає, є найбільш природнім описом границі області поразки, у якій зафіксовані осередки впливу. Оскільки вирішувати подібне завдання доводиться багаторазово, необхідно побудувати найбільш ошадливий (у змісті витрат пам'яті й трудомісткості) алгоритм. із цією метою метод рішення завдання повинен, по можливості, урахувати особливості розглянутого безлічі точок.

Зі створених алгоритмів впливає наступне твердження - послідовні вершини опуклого багатокутника розташовуються в порядку, відповідному до зміни кута щодо будь-якої внутрішньої точки.

Представимо промінь, що виходить із деякої внутрішньої точки  $q$  багатокутника  $P$  і, що заметає вершини багатокутника  $P$  у порядку руху проти годинникової стрілки, починаючи з положення, що збігається по напрямкові з позитивним напрямком осі  $x$  системи координат. У міру руху від вершини до вершини полярний кут (він вимірюється звичайним чином у напрямку проти годинникової стрілки від позитивного напрямку осі  $x$ ) променя монотонно збільшується. Саме це має на увазі, коли говорять про те, що вершини багатокутника  $P$  «упорядковані» («розташовуються в порядку»).

Тоді, якщо дані крайні точки деякої безлічі, то його опуклу оболонку можна знайти, вибравши крапку  $q$ , про яку відомо, що вона є внутрішньою крапкою оболонки, і впорядкувавши потім крайні точки відповідно до полярного кута відносно  $q$ . У якості точки  $q$  можна обрати центроїд безлічі крайніх точок, тому що відомо, що центроїд безлічі точок є внутрішньою крапкою опуклої оболонки.

Продовжимо розгляд комбінаторної геометрії з метою знаходження інших ефективних алгоритмів побудови опуклої оболонки.

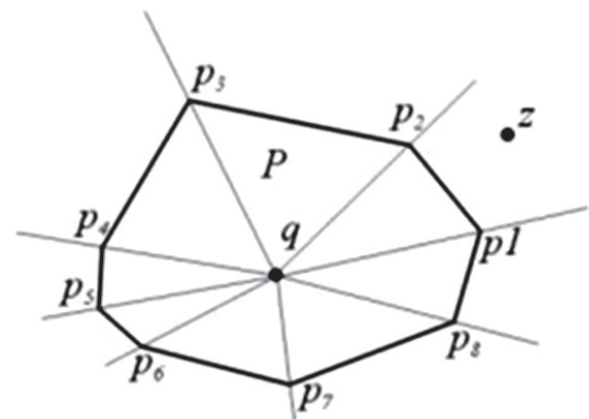


Рис. 1. Вершини багатокутника  $P$  упорядковані щодо точки  $q$

Багатокутник можна задати впорядкованою безліччю як його ребер, так і його вершин. У завданні

про опуклу оболонку ми звернули увагу на ізольовані крайні точки. Але можна замість цього спробувати визначити ребра опуклої оболонки. Якщо задана безліч точок, то досить важко швидко визначити, є чи ні деяка точка крайньої. Однак якщо дано дві точки, то безпосередньо можна перевірити, є чи ні з'єднуючий їхній відрізок ребром опуклої оболонки.

Відрізок  $l$ , обумовлений двома точками, є ребром опуклої оболонки тоді й тільки тоді, коли всі інші точки заданого безлічі лежать на одній або з однієї сторони від нього. Ребро  $pq$  є ребром опуклої оболонки, тому що всі точки безлічі розташовуються по одну сторону від нього;  $p'q'$  не є ребром опуклої оболонки, тому що по обидві сторони від нього є точки.

При цьому  $N$  точок визначають прямих. Для кожної із цих прямих можна, використовуючи формулу

$$\Delta = \begin{vmatrix} x & y & 1 \\ x' & y' & 1 \\ x'' & y'' & 1 \end{vmatrix}$$

визначити за лінійний час положення інших  $N-2$  крапок щодо цієї прямої і тим самим перевірити, задовольняє чи ні пряма заданим вище умовам. Таким чином, за час  $O(N^3)$  можна знайти всі пари точок, що визначають ребра опуклої оболонки. Потім ці крапки слід розташувати у вигляді списку послідовних вершин оболонки.

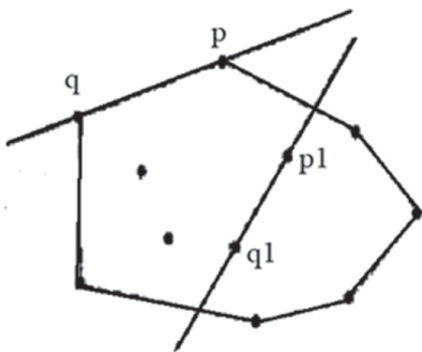


Рис. 2. Ребро опуклої оболонки не розділяє точки на частини

Якщо встановлене, що відрізок  $pq$  є ребром оболонки, то повинне існувати інше ребро з кінцем у крапці  $q$ . В [19] показано, як використовувати цей факт, щоб зменшити необхідний час до  $O(N^2)$ .

#### 4. Приклад програмної реалізації модуля побудови геометричних областей

Розроблений програмний комплекс призначений для інтерактивної роботи в режимі реального часу й забезпечує відображення даних, виконання розрахунків і відображення результатів з точністю до хвилин дуги. Усі основні дані й результати обробки, для полегшення їх сприйняття й підвищення якості аналізу, відображаються в графічному й у текстовому виді. Програмний комплекс відкритий для розширення з боку користувачів.

Основними модулями спроектованої програмної системи є наступні:

— географічна карта розглянутої території — дозволяє ознайомитися з особливостями рельєфу місцевості й розташуванням населених пунктів.

— база даних про населені пункти й інших об'єктів — дозволяє відображати, вводити й редагувати інформацію про населені пункти й інших об'єктах.

— база даних про осередки впливу — дозволяє відображати, вводити й редагувати інформацію про осередки впливу.

— побудова областей осередків впливу — дозволяє будувати й відображати: область впливу осередка на населені пункти й інші об'єкти (додатково виводиться список населених пунктів, що перебувають під впливом осередка); опуклу оболонку й лінії рівня (апроксимуючий багатокутник для довільного набору осередків впливу, відображати їх на карті разом з полігональними лініями рівня, задавати границю області зображення й заборонні для відображення зони).

Для наступної роботи із програмним комплексом слід виділити один з перерахованих режимів роботи (за замовчуванням активний перший режим — «Географічна карта»).

Другий режим роботи із програмним комплексом — «База даних про населені пункти й інші об'єкти». Користувачеві надаються наступні сервісні можливості по роботі з таблицею записів: установка поля для пошуку, пошук запису по полю, упорядкування записів по полю, установка/видалення активного запису, введення і редагування записів.

Третій режим роботи із програмним комплексом — «База даних про осередки впливу».

Побудова областей осередків впливу — наступний режим роботи із програмним комплексом — після вибору даного режиму роботи на основній формі активується форма «Побудова області дослідження осередків впливу».

У лівій частині програмного екрану у таблиці «Активні осередки впливу» можна побачити інформацію про осередки, що потрапили у досліджувану територію. Після цього користувачеві буде запропонований відповідний режим роботи. За допомогою клавіатури або миші можна виділити конкретний осередок, що нас цікавить та у реальному часі на карті відобразяться населені пункти, що потенційно потрапляють або потрапили у зону ризику забруднення. При цьому осередок впливу відобразиться на карті червоним маркером, а зона його впливу червоною зоною.

Ця форма призначена для побудови й відображення на карті: області впливу осередків на населені пункти й інші об'єкти (додатково виводиться список населених пунктів, що перебувають під впливом осередку); опуклої оболонки осередку впливу (апроксимуючий багатокутник для довільного набору осередків впливу) і ліній рівня для його внутрішності.

Завдання збитків інформаційній системі може проводитися за допомогою реалізації загроз системі в цілому й реалізації погроз інформації.

Загроза — потенційна небезпека порушення інформаційної безпеки, обумовлюється умовами

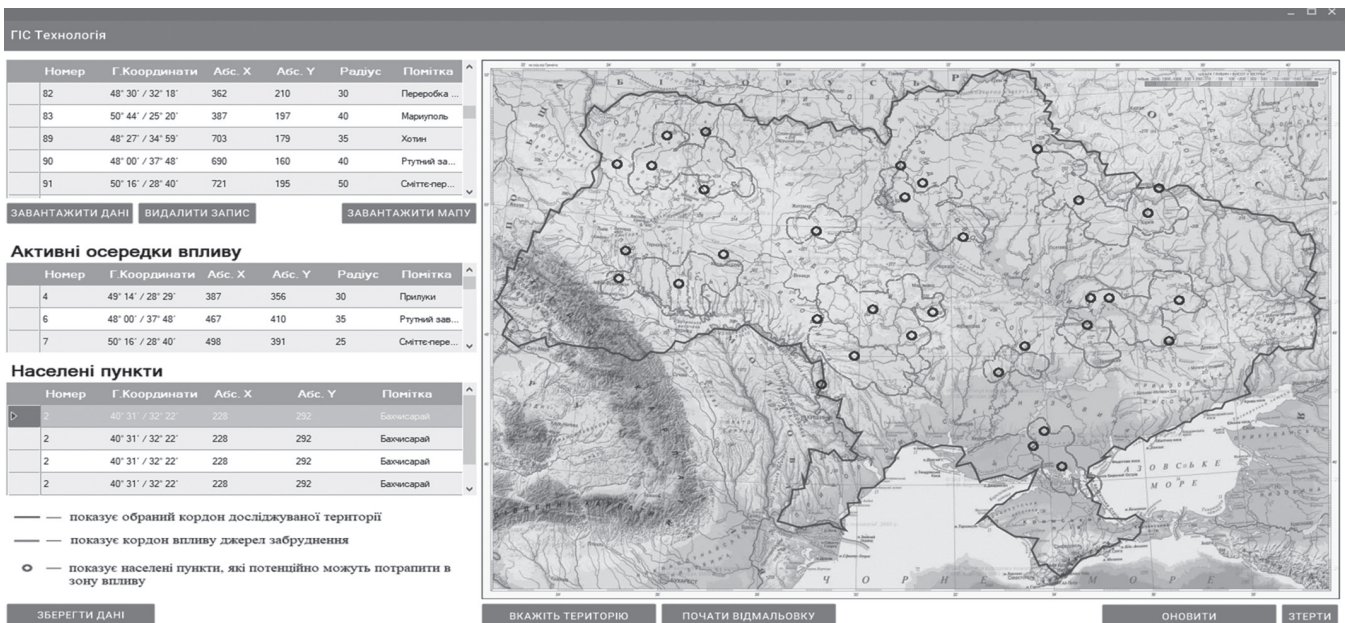


Рис. 3. Інтерфейс програмної системи

обробки (формування, передача, приймання) і зберігання інформації.

Усі реалізовані погрози можна розділити на два класи – активні й пасивні.

Активна погроза – погроза навмисної несанкціонованої зміни системи.

Пасивна погроза – несанкціонований вплив на систему без зміни стану

Несанкціонований доступ – доступ до інформації або до ресурсів з порушенням установлених у системі правил розмежування доступу (навмисний або випадковий).

Приклади погроз:

- розкрадання інформації й носіїв;
- несанкціоноване копіювання й поширення інформації;
- несанкціоноване підключення до апаратури, устаткування й каналів зв'язки з метою знімання інформації або впливу з метою завдання збитків;
- несанкціоноване підключення за рахунок спеціального математичного або програмного забезпечення;
- несанкціоноване перехоплення електромагнітних випромінювань.

При розробці й аналізі інформаційних технологій перше завдання – розробка моделі погроз і оцінка збитку від тих або інших погроз. На основі моделі погроз визначити завдання захисту з метою мінімізації збитку. Основним документом, який визначає порядок захисту є політика інформаційної безпеки.

Залежно від реалізованої політичної безпеки система захисту інформації (СЗІ) повинна надавати користувачеві інформаційних технологій наступні послуги:

- конфіденційність;
- цілісність;
- спостережуваність;
- доступність.

Одним з основних методів забезпечення якості названих послуг є застосування криптосистем. Під криптографічною системою розуміється сукупність алгоритмів і механізмів (засобів) захисту інформації за допомогою застосування криптографічних перетворень, а також керування ключовими структурами (даними).

### Висновок

Для рішення актуального завдання моделювання екологічної обстановки в Україні проведений аналіз проблеми, на підставі якого сформульовані й вирішені основні завдання дослідження.

Показано, що для рішення завдань моделювання екологічної обстановки необхідне створення ГІС, використання якої разом з розподіленою базою даних територіальної інформаційно-аналітичної системи екологічного моніторингу забезпечує підвищення ефективності збору даних і прогнозування екологічної обстановки, а також відображення результатів рішення безпосередньо на карту місцевості. На цій основі запропонований експериментальний варіант ГІС і відповідної їй бази даних, які використовуються для завдання вихідних даних при моделюванні обстановки й відображення результатів рішення на карту України.

Для оцінювання екологічної обстановки в будь-якій точці України запропоновані методи моделювання, засновані на інтерполяції даних екологічного моніторингу й прогнозуванні розподілу інтенсивності окремих викидів на основі конуса поширення забруднюючого речовини, що представляє рішення рівняння дифузії.

Запропоновані методи дозволяють прогнозувати рівні забруднення середовища на основі методів двовимірної інтерполяції. Залежно від завдання, вони забезпечують моделювання екологічної обстановки локально й глобально (для всієї території України)

— за рахунок можливості лінійної інтерполяції за значеннями рівнів забруднення в окремих місцях, а також поліноміальної Лагранжевої інтерполяції, за рахунок побудови регулярної сітки рівнів забруднення по цим первинним даним, і побудови ліній рівня для функції інтенсивності забруднення. При цьому користувач може задавати точність інтерполяції, відповідно щільності розміщення датчиків, на основі вибору порядку, що інтерполіє поліном в діапазоні від лінійної інтерполяції до полінома заданого ступеня  $k$  — по  $x$ , і  $m$  — по  $y$ . Запропоновані в роботі моделі й методи моделювання реалізовані у вигляді програмного комплексу (ПК), який забезпечує моделювання рівнів забруднення навколишнього середовища аерозолями й іншими домішками в режимі реального часу.

З метою його практичного використання параметри моделей прогнозування слід набудувати на особливості поширення конкретних типів забруднюючих речовин, що дозволить поповнити його іншими програмними рішення рівнянь дифузії, а також адаптувати використовувану ГИС, базу даних і систему інтелектуальної підтримки прийняття рішень на конкретні особливості розглянутого регіону (міста, району, області).

Математичне моделювання екологічних процесів являє собою потужний інструмент для кількісної оцінки зміни характеристик навколишнього середовища під впливом різних антропогенних факторів. Такі дослідження мають міждисциплінарний характер і, отже, для комплексного рішення екологічної проблеми поряд з фізичними моделями необхідні також хімічні, біологічні, агрофізичні й інші методи контролю навколишнього середовища, які будуть працювати в рамках єдиного комплексу, що дозволить більш повно досліджувати екологічні процеси з обліком прямих і зворотних зв'язків. Хоча основні принципи побудови моделей екологічної безпеки народно-господарських комплексів мають загальну платформу, однак окремі питання для кожного регіону є специфічними, тому необхідно проведення спеціальних екологічних досліджень.

ГИС-технологія поєднує традиційні операції при роботі з базами даних з перевагами повноцінної візуалізації й географічного аналізу, який надає карта. Ці можливості відрізняють ГИС від інших інформаційних систем.

#### Список літератури:

- [1] Вирішальна роль 3D даних у реагуванні на надзвичайні ситуації // [HTML] (<https://esriaustralia.com.au/esriaustralia-blog/the-crucial-role-of-3d-data-in-emergency-response-blg-186>).
- [2] Коновалова Н.В., Капралів Е.Г. Введення в ГИС. М.: Мир, 1997. 160 с.
- [3] Квіток В. Я. Геоінформаційні системи й технології. М.: Фінанси й статистика, 1998. 288 с.

- [4] С.Ю. Желтов, і ін. Особливості реалізації 3D ГИС // Інформаційний бюлетень Гис-Асоціації. 1997. № 5(12). С. 12-14.
- [5] Richards G.D. Numerical Simulation of Forest Fires // Int. J. for Numerical Methods in Engineering. - 1988. - Vol. 25. - P. 625 - 633.
- [6] Акименко В.В., Казанків Д. В., Симоненко А.Б. Засоби комп'ютерної графіки в завданні аналізу й контролю екологічного стану атмосфери регіону // Програм. продукти й системи. 1995. №3. С. 10-12.
- [7] Розширене дистанційне зондування: видобування та застосування наземної інформації: [HTML] (<http://edutechsoft.blogspot.com/2018/09/advanced-remote-sensing-terrestrial.html>), 2018. - 248 с.
- [8] Препарату Ф., Шеймос М. Обчислювальна геометрія. М.: Мир, 1089. - 478с.
- [9] Уваров Р.А. Моделювання екологічної обстановки з урахуванням турбулентного руху в атмосфері // Радіоелектроніка й інформатика. - 2001. - № 3. - С. 129-134.
- [10] Уваров Р.А. Математичне моделювання екологічної обстановки в Україні // Радіоелектроніка й інформатика. - 2000. - № 4. - С. 125 - 129.
- [11] Дискретні періодичні сплайни з векторними коефіцієнтами і поверхні Кунса // [PDF] [www.math.spbu.ru/mmeh/AspDok/pub/2010/Chashnikov.pdf](http://www.math.spbu.ru/mmeh/AspDok/pub/2010/Chashnikov.pdf)
- [12] Маніфест що таке карта з плаваючою формою // EEEI 2015, 10с. - [HTML] ([www.floatingsheep.org/2015/12/what-would-floating-sheep-map-manifesto.html](http://www.floatingsheep.org/2015/12/what-would-floating-sheep-map-manifesto.html))
- [13] Галак О.В., Козирєв А.Д., Орлов Я.В., Шубін І.Ю. Інформаційна технологія визначення зон ураження під час надзвичайних ситуацій. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2019, 15-17 травня 2019 р.: у 5 ч. Ч. V. / за ред. проф. Сокола Є.І. - Харків: НТУ "ХПІ". - 158 с.
- [14] Марчук Г.І., Кондратьєв К.Я. Пріоритети глобальної екології. М.: Наука, 1992. 264 с.
- [15] Марчук Г. І. Математичне моделювання в проблемі навколишнього середовища. М.: Наука, 1982. 324 с.
- [16] Багнок В. Якою буде наша енергетична стратегія? Аргументи проти атомної енергетики // Вісн. НАН України. - 2001. - № 9. - С. 29 - 37.
- [17] Клименко Е.Г. Програмно-алгоритмічні засоби інтелектуального аналізу даних // Радіоелектроніка й інформатика. - 2001. - № 3. - С. 64-67.
- [18] Chetverikov G.G., Vechirska I.D., Tanyanskiy S.S. The methods of algebra finite predicates in the intellectual system of complex calculations of telecommunication companies // International Conference Proceedings Crimean Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo). - 2014, 6959425. - pp. 346-347.
- [19] Бурів до виявлення знань у сховищах даних // Відкриті системи. 1999. №5-6. [HTML] (<http://www.osp.ru/os/1999/05-06/14.htm>).

Надійшла до редколегії 26.02.2020



**І.Ю. Шубін<sup>1</sup>, Г.Г. Четвериков<sup>2</sup>, С.М. Снісар<sup>3</sup>, С.Г. Літвін<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Кандидат технічних наук, професор кафедри програмної інженерії,  
Харківський національний університет радіоелектроніки,  
igor.shubin@nure.ua, ORCID iD: 0000-0002-1073-023X

<sup>2</sup>Доктор технічних наук, професор кафедри програмної інженерії,  
Харківський національний університет радіоелектроніки,  
grirorij.chetverykov@nure.ua, ORCID iD: 0000-0001-5293-5842

<sup>3</sup>Аспірант кафедри програмної інженерії,  
Харківський національний університет радіоелектроніки,  
sn.stanislav4@gmail.com, ORCID iD: 0000-0003-0260-3027

<sup>4</sup>Науковий співробітник НДЦ інтегрованих радіоелектронних систем і технологій,  
Харківський національний університет радіоелектроніки,  
riit.kharkiv.ua@gmail.com ORCID iD: 0000-0002-7183-6345

## **КАТЕГОРНИЙ АНАЛІЗ ЛОГІЧНИХ МЕРЕЖ ДЛЯ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМ РОЗПІЗНАВАННЯ**

Метою цього дослідження є створення універсальних методів проектування систем інтелектуального розпізнавання малопомітних радіолокаційних цілей, розробка загальної моделі логічної мережі, її адаптація відповідно до потреб практичного застосування у інтелектуальних радіолокаційних системах та вдосконалення методології виявлення повітряних об'єктів. Також метою дослідження є вирішення низки завдань, що відносяться до питань взаємозв'язку між теорією категорій і алгеброю предикатів, математичних засобів технології штучного інтелекту. Категорні моделі логічних мереж розглядаються як об'єкт досліджень. Методом обрано математичні моделі формалізації та представлення інформації на основі предикатних та модифікованих категорій. Проведено формалізацію досліджуваних моделей декларативною мовою, створеною в процесі дослідження, що дозволяє дослідити моделі за допомогою загальної універсальної моделі логічної мережі.

**ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ, АЛГЕБРА ПРЕДИКАТІВ, ПРЕДИКАТНА КАТЕГОРІЯ, ЛОГІЧНА МЕРЕЖА, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА РАДІОЛОКАЦІЙНА СИСТЕМА.**

Целью этого исследования является создание универсальных методов проектирования систем интеллектуального распознавания малозаметных радиолокационных целей, разработка общей модели логической сети, ее адаптация в соответствии с потребностями практического применения в интеллектуальных радиолокационных системах и совершенствование методологии обнаружения воздушных объектов. Также целью исследования является решение ряда задач, относящихся к вопросам взаимосвязи между теорией категорий и алгеброй предикатов, математических средств технологии искусственного интеллекта. Категорные модели логических сетей рассматриваются в качестве объекта исследований. Методом выбраны математические модели формализации и представления информации на основе предикатных и модифицированных категорий. Проведена формализация исследуемых моделей декларативным языком, созданным в процессе исследования, что позволяет исследовать модели с помощью общей универсальной модели логической сети.

**ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ, АЛГЕБРА ПРЕДИКАТОВ, ПРЕДИКАТНАЯ КАТЕГОРИЯ, ЛОГИЧЕСКАЯ СЕТЬ, ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ РАДІОЛОКАЦИОННАЯ СИСТЕМА.**

The purpose of the research is to create universal methods for designing intelligent recognition systems for low-visible radar targets, to develop a general model of logical network, to adapt it to the needs of practical application in intelligent radar systems and to improve methodology of air objects detection. Also, the aim of the research is to solve problems related to the relationship between the theory of categories and predicates algebra, mathematical kit of the artificial intelligence technology. The categorical model of logical networks is considered as an object of research. Mathematical models of formalization and presentation of information, as well as predicate and modified categories are chosen by the method. The formalization of the studied models by the declarative language created in the course of research is carried out, allows to investigate models by means of the general universal model of a logical network.

**ARTIFICIAL INTELLIGENCE, PREDICATE ALGEBRA, PREDICATE CATEGORY, LOGICAL NETWORK, INTELLIGENT RADAR SYSTEM.**

### **Вступ**

Серед множини формалізмів, застосованих тією чи іншою мірою до завдань обробки неформалізованої інформації, найбільш доцільним представляється використання алгебри предикатів, системи рівнянь якої реалізуються технічно у вигляді логічної мережі.

Однією з переваг такого підходу є його пряма застосовність до всіх перерахованих нижче типів завдань, що забезпечується декларативністю логічної мережі як методу рішення систем предикатних рівнянь. Запис же самих предикатних рівнянь стає можливим завдяки алгебрі предикатів.

На прикладі обробки радіолокаційної інформації штучним інтелектом можна розглянути загальну класифікацію завдань, що виникають у процесі роботи з первинною неформалізованою інформацією:

- аналіз (наприклад, розпізнавання – одержання з неформалізованої інформації конкретних параметрів, необхідних для застосування деякого формалізму);

- нормалізація – приведення інформації до деякої еталонної форми, що актуально в завданнях пошуку інформації;

- синтез – вираження внутрішнього представлення інформації, збереженої відповідно до формальних вимог у вигляді, адаптованому для сприйняття людиною;

- змішані завдання.

Іншою перевагою логічних мереж є широке розпаралелювання обчислень, що за умови правильної побудови моделі завдання дає гарантію високої ефективності. На сьогоднішній день розпаралелювання широко застосовується в окремих завданнях штучного інтелекту, зокрема – при розпізнаванні образів, що надходять від РЛС.

Крім того, мозкоподібна ЕОМ, заснована на технології логічних мереж, представляється близької по будові до структури людського мозку, що дає підставу сподіватися на створення заснованих на цій технології систем обробки інформації, близьких по можливостях до людських [1].

Вивчення категорій швидко перетворилося в самостійну абстрактну дисципліну, і тепер становить важливу галузь чистої математики. Крім того, вона вплинула на понятійні основи математики й мова математичної практики. Вона пропонує елегантні й потужні засоби для вираження зв'язків між великими галузями математики й забезпечує математиків знаряддями математичного дослідження, що займають усе більше й більше місця в арсеналі математики.

Проте на сьогоднішній день теорія категорій ще мало допомагає вирішувати такі проблеми, як опис механізмів людського інтелекту, як розвиток штучного інтелекту, створення ЕОМ паралельної дії, інтелектуальних радіолокаційних систем, тощо.

Отже, необхідно встановити зв'язок між теорією категорій і моделюванням систем на основі штучного інтелекту за допомогою проміжної галузі знань – алгебри кінцевих предикатів, засобами якої може бути побудована предикатна інтерпретація категорії. На базі цієї інтерпретації розробляються елементи теорії модифікованої категорії для процесів моделювання функцій штучного інтелекту.

### 1. Застосування логічних структур

Відмінною рисою завдань штучного інтелекту є те, що вони складно піддаються формалізації, необхідної для того, щоб уможливити автоматизацію їх

рішення. [2]–[3]. Таким чином, доцільно досліджувати універсальний інструмент обробки неформалізованої інформації – мозок людини й змодельовати деякі його функції, що стосуються поставлених завдань на базі сучасних технологій. Суть підходу полягає в тому, що інтелект людини розглядається як логіка в дії, як деяке матеріальне втілення механізму логіки. Були виконані роботи з алгебраїзації логіки [4].

У результаті розроблений спеціальний математичний апарат для формульного представлення відношень і дій над ними, які називаються алгебро-логічними структурами [5]–[6]. Відношення інтерпретуються як думки інтелекту, а дії над ними – як мислення.

Схемна реалізація формул, що описують алгебро-логічні структури, приводить до характерних інженерних мереж, що не використовувалися раніше, і які називаються логічними мережами. При зіставленні цих мереж з основними типами нейроструктур виявляється глибока подібність будови технічних і біологічних конструкцій. Опираючись на цю подібність, можна визначити функції різних типів нейронних структур і описати в точних математичних і технічних термінах принципи функціонування мозку.

Головне в даному методі – це рух зверху вниз: від загальних системних міркувань до алгебро-логічних структур, а від них – до логічних мереж, які потім ототожнюються з біологічними нейронними структурами.

Основу інтелектуальних систем розпізнавання радіолокаційних об'єктів становлять логічні мережі.

У відмінності від традиційного для інформаційних технологій алгоритмічного підходу, декларативна модель завдання не являє собою алгоритму. Модель завдання представлена в декларативній формі звичайно являє собою набір фактів, знань про факти й правил, згідно з якими проводяться дії над фактами, що дозволяють одержати нові знання на основі старих.

Логічна мережа являє собою метод рішення систем предикатних рівнянь, і має описові можливості алгебри предикатів [7]. Властивістю логічної мережі є паралельне виконання всіх елементарних логічних операцій – тобто максимально можливе на логічному рівні паралельних обчислень. Такий підхід гарантує високу ефективність рішення завдань, що зводяться до логічного висновку або до рішення логічних рівнянь.

Для формалізації завдань обробки неформалізованої інформації за допомогою логічних мереж необхідно досліджувати можливості раціонального застосування алгебри кінцевих предикатів [8]–[11]. Із цією метою необхідно провести моделювання найбільш загальних завдань із різних галузей даної предметної області. Як приклад обраний такі галузі як: завдання

моделювання механізмів розпізнавання малопомітних радіолокаційних об'єктів.

## 2. Аналіз безоб'єктних категорій

Відмінність між теорією категорій і алгеброю предикатів полягає лише в тому, що перша здійснює рух зверху вниз, націлена на пізнання вищих логічних механізмів і тому використовує в якості відправних поняття рекордного рівня спільності. Друга ж, відправляючись від потреб інформатизації, рухається у вивченні тієї ж логіки мислення знизу нагору. Якщо б удалося дати переконливу інтерпретацію понять, формованих теорією категорій, і методів, розроблених нею, у термінах алгебри предикатів, тобто, конкретизуючи, наблизити їх до інформатизації, це суттєво збагатило б інструментарій алгебри предикатів. Саме алгебру предикатів ми збираємося використовувати в ролі такої проміжної області знання.

Логічна мережа копіює дії людини, але з тією лише різницею, що людина діє послідовно, а мережа – паралельно. Мережа працює по тактах. У першому півтакті  $i$ -го такту мережа для кожного зі своїх рівнянь виду  $DO(x, y)=1$  ( $DO$  – відношення, задане таким рівнянням) відшукує: 1) по відомим знанням  $P_i(x)$  про значення змінної  $x$  на початку  $i$ -го такту знання  $Q'_i(y)$  про значення змінної  $y$  наприкінці  $i$ -го такту; 2) по відомим знанням  $Q_i(y)$  про значення змінної  $y$  на початку  $i$ -го такту знання  $P'_i(x)$  про значення змінної  $x$  наприкінці  $i$ -го такту. Математично ці дві операції виражаються формулами:

$$\exists x \in A(K(x, y)P_i(x))=Q'_i(y); \quad (1)$$

$$\exists x \in B(K(x, y)Q_i(y))=P'_i(x) \quad (2)$$

де  $A$  і  $B$  – області зміни змінних  $x$  і  $y$ .

У другому півтакті кожного такту мережа відшукує загальну частину  $P_{i+1}(x)$  усіх знань  $P'_{i1}(x), P'_{i2}(x), \dots, P'_{in}(x)$  про значення кожної зі своїх предметних змінних  $x$  сторін, що надходять по галузях мережі із усіх, до полюса  $x$ . Виражається ця операція в такий спосіб:

$$P'_{i1}(x) \wedge P'_{i2}(x) \wedge \dots \wedge P'_{in}(x)=P_{i+1}(x) \quad (3)$$

Отримане знання  $P_{i+1}(x)$  потім використовується в ролі стану полюса  $x$  у початковий момент  $i+1$ -го такту. Символ  $I$  позначає число галузей, що підходять до полюса  $x$ . До початку  $i+1$ -го такту в кожному полюсі формується знання про множину  $P_{i+1}(x)$ , яка завжди виявляється включеним у знання о множині  $P_i(x)$ , що втримувалася в тому ж полюсі на початку  $i$ -го такту. Таким чином, єдиним результатом роботи логічної мережі є уточнення знань, що втримуються у всіх її полюсах відповідно до вихідних даних.

При впровадженні теорії категорій поряд зі звичайним поняттям категорії зустрілося й більш загальне поняття безоб'єктної категорії.

Нехай  $M$  – деяка множина. Її елементи, позначені символами  $f, g, h, \dots$ , називаються морфізмами.

Нехай, крім того, задана якась, в загальному випадку, часткова, операція  $fg = h$ , що діє з  $M \times M$  у  $M$ . Вона називається множенням морфізмів  $f$  і  $g$ . Морфізм  $h$  називається добутком морфізмів  $f$  і  $g$ . Будь-який морфізм  $e \in M$  називається одиничним або тотожним, якщо він задовольняє наступним умовам:

- $ee=e$ ;
- при будь-якому  $f \in M$ , для якого існує добуток  $fe \in M$ , виконується рівність  $fe=f$ ;
- при будь-якому  $f \in M$ , для якого існує добуток  $ef \in M$ , виконується рівність  $ef=f$ .

Цим визначенням мовчазно допускається існування в категорії багатьох одиниць. Саме наявність багатьох одиниць (і тільки це) відрізняє категорію від інших відомих алгебраїчних структур. Одиничні морфізми  $ef$  і  $e'_f$  називаються відповідно до правих і лівих для морфізма  $f \in M$ , якщо  $fef=f$  і  $fe'_f=f$ . Для будь-якого морфізма  $f \in M$  існують єдиний правий і єдиний лівий одиничні морфізми. Це твердження називається законом тотожності. Таким чином, для кожного  $f \in M$  існує єдина права одиниця  $ef$  і єдина ліва одиниця  $e'_f$ , такі, що  $fef = fe'_f = f$ .

Множення морфізмів асоціативно:  $(fg)h = f(gh)$  при будь-яких  $f, g, h \in M$ , для яких існують добутки:  $(fg)h$  і  $f(gh)$ . Множина  $M$ , у якій утримуються, принаймні, одиничні морфізми, і на якій задана операція множення морфізмів із зазначеними вище властивостями називається безоб'єктною класичною категорією  $K$ . Пишуть  $M = \text{Mork}$ ,  $f \in M$ ,  $f \in \text{Mork}$ .  $\text{Mork}$  – це множина усіх морфізмів категорії  $K$ . Якщо  $f \in \text{Mork}$ , то говорять, що морфізм  $f \in K$ -Морфізмом.

## 3. Алгоритми категорії з об'єктами

У процесі конкретизації раніше введене поняття обростає додатковими властивостями. На додаток до морфізмів категорії  $K$  вводимо об'єкти категорії  $K$ . Множина усіх об'єктів категорії  $K$  записується у вигляді  $\text{Ob}$  в  $K$  або  $\text{Obk}$ . Об'єкти позначаємо буквами  $A, B, C, \dots$ . Якщо  $A \in \text{Obk}$ , то говорять, що  $A \in K$ -об'єктом. Говорять, що  $f \in$  морфізм із об'єкта  $A$  в об'єкт  $B$ , і пишуть  $f: A \rightarrow B$  або  $A \xrightarrow{f} B$ . Об'єкт  $A$  називається початком морфізма  $f$ , а об'єкт  $B$  – його кінцем. Замість терміну «морфізм» також використовується слово форма.

Кожній парі  $(A, B)$  об'єктів  $A, B \in \text{Obk}$  ставиться у відповідність якась, можливо й порожня, множина  $HK(A, B)$  морфізмів категорії  $K$ . Можливий випадок, коли багатьом різним морфізмам, наприклад,  $f, g, h$ , поставлена у відповідність та сама пара об'єктів  $(A, B)$ , тобто  $f, g, h: A \rightarrow B$ . Такі морфізми називаються паралельними. А для якоїсь іншої пари об'єктів  $(C, D)$  у категорії  $K$  взагалі може не знайтися жодного морфізма  $f$ , такого що  $f: C \rightarrow D$ . Замість запису  $HK(A, B)$  також використовуються позначення  $\text{Hom}(A, B)$ ,  $\text{Mork}(A, B)$ ,  $K(A, B)$ , а якщо це не приводить до

двозначності, – те й більш лаконічні записи  $H(A, B)$ ,  $\text{Hom}(A, B)$ ,  $\text{Morf}(A, B)$ . Замість запису  $f \in HK(A, B)$  інакше пишуть  $f: A \rightarrow B$  або  $A \xrightarrow{f} B$ ;  $A = \text{dom}f$  (початок морфізма, у прийнятій нами інтерпретації – його область визначення),  $B = \text{cod}f$  (кінець морфізма, у нашій інтерпретації – його область значень).

Категорія з об’єктами  $K$  складається з множини морфізмів  $\text{Morf}K$  і множини об’єктів  $\text{Obj}K$ . Передбачається, що множини  $\text{Morf}K$  і  $\text{Obj}K$  не перетинаються. Категорія  $K$  характеризується наступними п’ятьма властивостями:

- кожній парі  $K$ -об’єктів  $A, B$  відповідає множина  $HK(A, B)$  морфізмів (можливо, навіть порожнє), включене в  $\text{Morf}K$ ;

- для кожного морфізма  $f \in \text{Morf}K$  існує єдина пара  $A, B$   $K$ -об’єктів, така що  $f \in HK(A, B)$ ;

- у множині  $\text{Morf}K$  визначена, загалом кажучи часткова, двомісна операція – множення морфізмів; добуток  $fg$  морфізмів  $f: A \rightarrow B$  і  $g: B \rightarrow C$  визначене лише в тих випадках, коли  $B=C$ , тобто коли кінець морфізма  $f$  збігається з початком морфізма  $g$ . У цьому випадку добуток  $fg \in K$ -морфізм із об’єкта  $A$  в об’єкт  $D$ . У цьому випадку говорять, що для об’єктів  $A, B, C \in K$  визначене відображення

$$H_K(A, B) \times H_K(B, C) \rightarrow H_K(A, C) \quad (4)$$

Знак  $\times$  у цьому випадку позначає декартовий добуток множин морфізмів. Морфізми  $f, g$  категорії  $K$  виду  $f: A \rightarrow B$  і  $g: B \rightarrow C$  називаються послідовними, а виду  $f: A \rightarrow B$  і  $g: A \rightarrow B$  – паралельними.

Закон асоціативності можна наочно виразити графічно у вигляді категорної діаграми зображеної на рисунку 1.

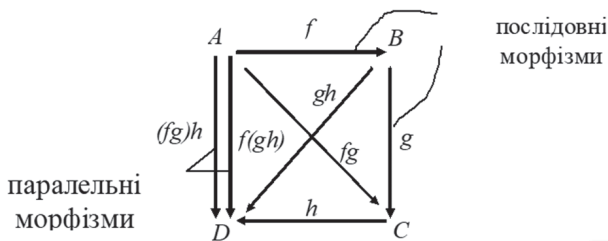


Рис. 1. Графічне подання закону асоціативності

Будь-яка категорна діаграма утворюється з об’єктів і стрілок (морфізмів), вона являє собою орієнтований граф з розфарбованими вершинами й дугами. У ролі вершин графа в категорній діаграмі виступають об’єкти категорії, а в ролі дуг її морфізми. Такого виду діаграми широко використовуються в теорії категорій. Вони – головний засіб наочної вистави внутрішньої будови й властивостей математичних структур, зв’язків між ними.

Діаграма, що виражає категорний закон асоціативності, характеризує зв’язки між будь-якими об’єктами  $A, B, C, D$  і морфізмами  $f, g, h$ . Ці зв’язки виражають суть закону асоціативності. В даному випадку ми висловили один із законів теорії категорій.

Категорні діаграми поділяються на замкнуті і розімкнуті. Діаграма, що виражає категорний закон асоціативності, відноситься до числа замкнутих. Замкнені діаграми називаються інакше комутативними. Така назва походить від того, що комутативність діаграми характеризуються тим, що результат дії морфізма при їх послідовному виконанні, зазначеному на діаграмі, виходить однаковим під час руху різними шляхами діаграми, якщо ми вирушаємо від однієї і тієї ж точки діаграми і приходимо знову до однієї і тієї ж точки іншої діаграми.

Категорні діаграми поділяються на загальні і окремі. Загальні діаграми комутативні для всіх об’єктів і морфізмів даної категорії. Спільними комутативними діаграмами виражаються властивості будь-якої конкретної категорії. Окремі категорні діаграми відносяться до конкретних об’єктів і морфізмів. Це можуть бути як замкнуті, так і розімкнені категорні діаграми. На рис. 2 наведено приклад розімкнутої діаграми.

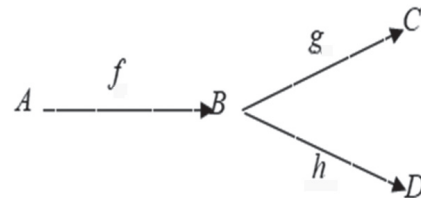


Рис. 2. Розімкнена діаграма

Мовою комутативних діаграм виражаються загальні зв’язки між об’єктами і морфізмами. За допомогою комутативних діаграм можна висловлювати властивості будь-яких математичних структур, навіть закони самої теорії категорій.

#### 4. Модель алгоритму вибору варіантів мережі

Два варіанти, що розроблені є ізоморфними. Можна записати відношення ізоморфізму, що переводить один варіант в інший. Для побудови ізоморфізму потрібно:

- поміняти місцями змінні  $x$  й  $y$ .
- для  $t_1$  та  $t_2$  поміняти місцями 1 та 2.

Ізоморфізм повністю характеризується табл. 1.

Таблиця 1

Ізоморфізм змінних $t_1$ і $t_2$	
$t_1$	$t_2$
0	0
1	2
2	1

Для представлення моделі завдання, що сформульовано в термінах алгебри кінцевих предикатів, у програмній моделі використовується формальна декларативна мова [12]. Опис ділиться на дві частини – опис логічної мережі завдання – база даних, що містить правила, по яких можна одержати нові знання про факти, і база даних, що містить обмеження змінних (знання про факти).

Область істинності бінарного предиката завдає багатозначну функцію, значенням якої є підмножина області завдання змінної, відповідній до сусідньої вершини.

Наприклад, модифікована змінна  $z_n$  має множини значень  $\{M\ GO\}$ , а предикат, що зв'язує її з іншою змінною  $r$  має вигляд

$$P_7(z_n, r) = z_n^{\text{II}}(r^1 \vee r^4 \vee r^9 \vee r^{11}) \vee z_n^{\text{GO}}(r^2 \vee r^5) \vee z_n^{\text{MY}} r^3 \vee z_n^{\text{M}}(r^6 \vee r^7 \vee r^{16}) \vee z_n^{\text{Я}} r^8.$$

Під час другого півтакту обчислюються перетинання знайдених на першому півтакті образів з множинами значень цільових змінних. Таким чином, якщо змінна  $r$  має множину значень  $\{1\ 3\ 4\ 5\ 6\ 7\ 8\}$ , то після другого півтакту ця множина скоротиться до  $\{2\ 5\ 6\ 7\ 16\} \cap \{1\ 3\ 4\ 5\ 6\ 7\ 8\} = \{5\ 6\ 7\}$ . Ці перетинання являють собою нові значення цільових змінних.

Якщо кожна змінна прийняла конкретне значення – стан мережі відповідає рішенню заданої системи предикатних рівнянь. Якщо деякі змінні зазначають множину значень – це говорить про те, що початкової інформації недостатньо для знаходження однозначного рішення і поставлене завдання допускає кілька рішень, що задовольняють поставленим умовам.

Випадок, коли значення всіх змінних відповідають порожнім множинам, свідчить про те, що початкові дані суперечливі.

Оскільки логічні мережі є графічним вираженням алгебро-логічного опису об'єкта, то з практичної точки зору вигідніше розглядати модифіковану предикатну категорію зі визначеною операцією множення, що базується на використанні властивостей алгебри предикатів. Для того щоб практично використовувати поняття предикатної модифікованої категорії, спочатку потрібно отримати загальну модифіковану категорію, окремим випадком якої вона є. Тому слід абстрагуватися від поняття модифікованої предикатної категорії і сформувані як альтернативу загальному поняттю класичної категорії, загальне поняття модифікованої категорії.

### 5. Логічні системи розпізнавання об'єктів

Визначимо роль логічної мережі: логічні мережі являють собою універсальний, простий і природний засіб наочного представлення структури будь-яких об'єктів, так само як будь-який алгебро-логічний опис об'єкта природно графічно виражається у вигляді логічної мережі, а також завдяки тому, що мова алгебри предикатів універсальна, нею можна формально описати структуру довільного об'єкта.

Результатом формального опису будь-якого об'єкта мовою алгебри предикатів завжди є деякий предикат  $P(x_1, x_2, \dots, x_m)$ . Він повинен виражати деяке цілком визначене відношення  $P$ , яке являє собою безліч всіх наборів предметів  $x_1, x_2, \dots, x_m$ , що

задовольняють рівняння  $P(x_1, x_2, \dots, x_m)=1$ . Саме це відношення виражає структуру описуваного об'єкта. Якщо для описання деякого предметного простору  $S$  повинні одночасно виконуватися кілька відношень, то це призводить до кон'юнкції відповідних предикатів.

Отримання предиката  $P$  з предикатів  $P_1, P_2, \dots, P_n$  системи  $\{P_1, P_2, \dots, P_n\}$  називається його композицією. Зворотне перетворення предиката  $P$  в систему  $\{P_1, P_2, \dots, P_n\}$  предикатів  $P_1, P_2, \dots, P_n$  називається його декомпозицією. Композиція та декомпозиція предикатів нерозривно пов'язані одна з одною.

Операція отримання предиката  $P$  з предикатів  $P_1, P_2, \dots, P_n$  вважається композицією у тому і тільки тому випадку, якщо існує зворотна їй операція, що дозволяє відновити ті ж самі предикати  $P_1, P_2, \dots, P_n$  за предикатом  $P$ . Так само, операція перетворення предиката  $P$  в систему предикатів  $P_1, P_2, \dots, P_n$  може бути названа декомпозицією тоді і тільки тоді, коли існує зворотна їй операція, що відновлює предикат  $P$  за предикатами  $P_1, P_2, \dots, P_n$ .

Тепер ми можемо дати формальне визначення логічної мережі, яку можна визначити, як пристрій, за допомогою якого сьогодні мислить людина, а завтра будуть мислити також і мозкоподібні ЕОМ.

Логічною мережею називається графічне представлення результату бінарної кон'юнктивної декомпозиції багатомісного предиката, оскільки саме предикати є універсальним засобом формального опису структури будь-яких об'єктів.

Розум створює моделі сприйнятих ним об'єктів і виокремлює з них корисні відомості, завдяки яким його носій – людина може жити і ефективно діяти в навколишньому світі. Нічим іншим він не займається. Предикати як раз і є такими моделями.

Надзвичайно важливим є те, що саме при прийнятому формальному визначенні логічна мережа, а не що-небудь інше, виявилася простим і природним універсальним засобом графічного представлення структури будь-якого об'єкта. Це – вагомий аргумент на користь того, щоб ототожнити формальне визначення логічної мережі з її змістовним визначенням.

Логічна мережа дозволяє вирішувати не тільки пряму і зворотну задачі розпізнавання. Вона дозволяє вирішувати задачу з будь-яким набором вихідних даних. Якщо дані суперечливі – отримаємо в результаті порожню множину, якщо даних недостатньо – отримаємо неоднозначне розв'язання. Використання логічної мережі для цього завдання є ефективним рішенням – завдання вирішується в 2 такти – всі незалежні операції виконуються паралельно.

Побудова логічних систем розпізнавання об'єктів, що містять велику кількість класів і ознак, та оцінка їх ефективності пов'язані зі значними труднощами, вирішення яких є предметом майбутніх досліджень у цій області знань.

Традиційно завдання логічного розпізнавання вирішуються за допомогою булевої алгебри. Класи і ознаки об'єктів розглядаються як булеві змінні. Варто ще раз підкреслити, що логічна мережа призначена для вирішення більш складних (в сенсі моделювання) завдань, що відносяться до більш загального класу. Будучи методом розв'язання систем рівнянь алгебри скінченних предикатів, логічна призначена для вирішення завдань, що вимагають набагато більших описових можливостей, ніж надає, наприклад, булева алгебра.

### Висновки

В даному дослідженні за допомогою категорних моделей логічних мереж вдосконалено математичне забезпечення, що є фундаментальним інструментом розробки інтелектуальних радіолокаційних систем, а також дозволяє покращити якісні й кількісні характеристики інтелектуальних радіолокаційних комплексів.

Проведене дослідження показало, що алгебра предикатів є зручним і ефективним способом формального запису інформації загального виду. Модель, побудована засобами алгебри предикатів, являє собою систему предикатних рівнянь, для ефективного вирішення якої служить логічна мережа, що надає можливості як для апаратної реалізації, так і для моделювання її на сучасних ЕОМ, що і було виконане в рамках даної роботи.

Розвиток та практичне застосування технологій моделювання на основі логічних мереж є продовженням науково-дослідної роботи, що проводиться на кафедрі Програмного забезпечення в ХНУРЕ.

Таким чином були вдосконалені методи формалізації та вирішена науково-практична задача підвищення ефективності процесів обробки радіолокаційних сигналів та видачі рекомендацій щодо типу та поведінки радіолокаційного об'єкта. Ця інформаційна технологія може використовуватися в системах радіолокаційного моніторингу повітряного простору, системах медичної діагностики, системах управління рухомими об'єктами тощо.

У майбутніх дослідженнях увагу буде зосереджено на створенні математичного апарату, моделей та методів прогнозування поведінки радіолокаційних об'єктів на базі можливостей розпаралелювання обчислень з допомогою технології логічних мереж.

### Література

- [1] *Бондаренко М.Ф., Дудар З.В., Єфімова І.А., Лецинский В.А., Шабанов-Кушнарченко С.Ю.* Про мозкоподібні ЕОМ // *Радіоелектроніка й інформатика.* – 2014. – № 2. – С. 21-38.
- [2] *Fourier J.* Un modele d'indexation relationnel pour les graphes conceptuels fondee sur une interpretation logique: Phd thesis // *Universitee.* – Grenoble, 1998.- 302 p.
- [3] *Хьюбелл Д.* Око, мозок, зір // *М.: Мир,* 2010. – 239 с.
- [4] *Климушев В.Б.* Моделювання кореляційного алгоритму розпізнавання образів на базі формальної граматики // *Автоматизовані системи керування й прилади автоматизи.* –2001. – №115.– С. 54-74.
- [5] *Шрейдер Ю. А., Шаров А. А.* Системи й моделі // *М.: Радіо й зв'язок,* 1982. – 152 с.
- [6] *Плоткин Б.І.* Універсальна алгебра, алгебраїчна логіка й бази даних // *М.: Мир,* 1990.– 322 с.
- [7] *Бондаренко М.Ф., Осика А.Ф.* Автоматична обробка інформації природньою мовою. // *Київ: УМК В,* 1991. –143 с.
- [8] *Бондаренко М.Ф., Дудар З.В., Процай Н.Т., Черкашин В.В., Чикина В.А., Шабанов-Кушнарченко Ю.П.* Алгебра предикатів і предикатних операцій // *Радіоелектроніка й інформатика.* – 2004.–№ 1. – С. 5-22.
- [9] *Нильсон Н.* Принципи штучного інтелекту // *М.: Радіо й зв'язок,* 1985. – 373 с.
- [10] *Шабанов-Кушнарченко Ю.П.* Про теорію інтелекту // *Проблеми біоніки* // *Х.: Вища школа,* 1979. – Вип. 22. – с. 3 – 11.
- [11] *Шабанов-Кушнарченко Ю.П.* Теорія інтелекту. Проблеми й перспективи // *Х.: Вища школа,* 1987. –160 с.
- [12] *Chetverikov G.G., Vechirska I.D., Tanyanskiy S.S.* The methods of algebra finite predicates in the intellectual system of complex calculations of telecommunication companies // *International Conference Proceedings Crimean Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo).*-2014, 6959425. - pp. 346-347.

*Надійшла до редколегії 16.03.2020*



Росіца Іліянова Манєва<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Аспірант кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління, НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна, maneva.rositsa@gmail.com, ORCID 0000-0002-4361-1931

## РОЗРОБКА АРХІТЕКТУРИ АГЕНТНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ БІЗНЕС-ПРОЦЕСІВ

The success of a company in the market depends on many factors: the range of services offered, market saturation, marketing policy. An intelligent analysis of processes is to identify, analyze the efficiency, and optimize the business processes of the enterprise. In the field of information technology, and in particular, in various areas of artificial intelligence, the use of multi-agent systems is of particular interest. In the context of the use of multi-agent systems for the design of intelligent systems for various purposes, the development and study of a model and software implementation of a prototype of an agent platform are relevant. The purpose of this work is to develop and research an agent platform that can be implemented in the work of a company interested in modeling and monitoring business processes in real-time. The work is devoted to the analysis of existing approaches to the design of multi-agent software systems and the development of software components of the agent platform using the Kotlin programming language. A prototype of an agent-based platform has been developed based on the use of formal methods for designing multithreaded systems. According to the test results, the developed prototype has advantages over the existing solutions in terms of processor load and memory usage. It is concluded that the number of agents is the main parameter affecting the reliability and efficiency of the developed agent platform.

**KEYWORDS:** INTELLIGENT BUSINESS PROCESS ANALYSIS, MULTI-AGENT PLATFORM, KOTLIN, PROTOTYPE, ORDER DISTRIBUTION.

Успешность работы компании на рынке зависит от многих факторов: диапазона предлагаемых услуг, насыщенности рынка, маркетинговой политики. Интеллектуальный анализ процессов заключается в выявлении, анализе эффективности и оптимизации бизнес-процессов предприятия. В области информационных технологий, и в частности, в разных направлениях искусственного интеллекта, особый интерес вызывают использование многоагентных систем. В контексте применения многоагентных систем для проектирования интеллектуальных систем различного назначения, разработка и исследование модели и программной реализации прототипа агентной платформы является актуальной. Цель данной работы - разработка и исследование агентной платформы, которая может быть внедрена в работу компании, заинтересованной в моделировании и мониторинге бизнес-процессов в реальном времени. Работа посвящена анализу существующих подходов конструирования многоагентных программных систем и разработке программных компонентов агентной платформы с использованием языка программирования Kotlin. Разработан прототип агентной платформы на основе использования формальных методов проектирования многопоточных систем. Согласно результатам тестирования разработанный прототип имеет преимущества по сравнению с уже существующими решениями с точки зрения нагрузки процессора и использования памяти. Сделан вывод, что количество агентов является главным параметром, влияющим на надежность и эффективность разработанной агентной платформы.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ, МНОГОАГЕНТНАЯ ПЛАТФОРМА, KOTLIN, ПРОТОТИП, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКАЗОВ.

Успішність роботи компанії на ринку залежить від багатьох чинників: діапазону пропонованих послуг, насиченості ринку, маркетингової політики. Інтелектуальний аналіз процесів полягає у виявленні, аналізі ефективності та оптимізації бізнес-процесів підприємства. В області інформаційних технологій, і зокрема, в різних напрямках штучного інтелекту, особливий інтерес викликають використання багатоагентних систем. В контексті застосування багатоагентних систем для проектування інтелектуальних систем різного призначення, розробка та дослідження моделі та програмної реалізації прототипу агентної платформи є актуальною. Мета даної роботи – розробка та дослідження агентної платформи, яка може бути впроваджена в роботу компанії, зацікавленої в моделюванні та моніторингу бізнес-процесів в реальному часі. Робота присвячена аналізу існуючих підходів конструювання багатоагентних програмних систем і розробці програмних компонентів агентної платформи з використанням мови програмування Kotlin. Розроблено прототип агентної платформи на основі використання формальних методів проектування багатониткових систем. Згідно із результатами тестування розроблений прототип має переваги в порівнянні із вже існуючими рішеннями з точки зору навантаження процесору та використання пам'яті. Зроблено висновок, що кількість агентів є головним параметром, який впливає на надійність та ефективність розробленої агентної платформи.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ІНТЕЛЛЕКТУАЛЬНИЙ АНАЛІЗ БІЗНЕС-ПРОЦЕСІВ, БАГАТОАГЕНТНА ПЛАТФОРМА, KOTLIN, ПРОТОТИП, РОЗПОДІЛ ЗАМОВЛЕНЬ.

### Вступ

Успішне функціонування будь-якої фірми у ринковому середовищі може бути забезпечено лише за наявності точної, повної і достовірної інформації.

Саме така інформація допомагає визначати відношення споживачів, постійно слідкувати за зовнішнім середовищем, координувати стратегію і оцінювати діяльність, підвищувати рівень рекламної роботи,

отримувати підтримку у прийнятих рішеннях, підтверджувати власну комерційну інтуїцію, підвищувати ефективність діяльності. Інформаційні системи в тому чи іншому вигляді широко і досить давно використовуються для підтримки діяльності на підприємствах. Незважаючи на це, дослідження структури та функціоналу інформаційних систем залишається досить актуальним у зв'язку з швидким розвитком інформаційних технологій.

Сучасні підприємства стикаються з все більш конкурентоспроможним ринком. У цьому контексті успіх підприємств критично залежить від якості та ефективності їхніх бізнес-процесів. Інтелектуальний аналіз процесів спрямований на побудову та вдосконалення моделей функціонування взаємодіючих фізичних або інформаційних об'єктів на основі обробки інформації, які фіксують таку поведінку [1]. Роботи в області інтелектуального аналізу процесів зазвичай присвячені розробці методів і технології побудови моделей процесів обробки ресурсів на основі послідовності подій, що відображають поведінку реального неформалізованого процесу і зафіксовані в журналі реєстрації подій [1-3]. Підхід, представлений у даній роботі, спрямований на побудову програмної системи для інтелектуального аналізу бізнес-процесів, формування організаційної структури робіт в режимі реального часу та моніторингу ефективності бізнес-процесів в умовах динамічного бізнес-оточення.

Аналіз наукових публікацій показує, що питання ефективного впровадження гнучких методологій управління стає все більш актуальним. Так, автори [4] доказують, що відмінності в організаційних типах впливають на успіх проектів у всіх аспектах. У роботі [5] підкреслюється, що гнучкі методи працюють краще, ніж традиційні методології, навіть у великих, розподілених проектах. Побудова кращої комунікації та співпраці в колективі розглядається як результат дотримання гнучких практик що приводить до поліпшення відносин між членами команди та поліпшення показників задоволеності працівників. Це набуває особливої актуальності з розвитком віртуальних розподілених команд проектів. Питанням дослідження особливостей віртуальних команд присвячено, зокрема, роботи [6, 7].

Завдяки тому, що структура багатоагентних систем дуже близька структурам реального світу, тому область застосування агентних систем дуже широка: робототехніка; логістика; дослідження соціальних і біологічних систем; пошук інформації; інтернет речей; програмні компоненти для умних домівок. Багатоагентні моделі активно використовуються для вдосконалення бізнес-процесів організації. В роботі [8] запропонована онтологія моделювання бізнес-процесів та багатоагентна система надання

інтелектуальної допомоги членам команди з розробки програмного забезпечення. Для вирішення задачі обробки журналу реєстрації подій, яка вирішується при інтелектуальному аналізі процесів, в роботі [9] запропоновано підхід до формування системи обмежень у вигляді набору правил, а також його реалізацію на основі багатоагентної системи. Таким чином, дослідження агентів та багатоагентних систем ведуться досить давно, але завдання побудови універсальної архітектури багатоагентних систем, як і раніше, в повній мірі не вирішено.

## 1. Постановка задачі

В сучасному світі інформація має величезну цінність. З розвитком ринків і вдосконаленням технологій, споживачі дістають великі можливості у виборі задовольняючих їх товарів і послуг. При цьому, через доступ до великого об'єму найрізноманітнішої інформації, вони стають все більш розбірливими. В такій ситуації передбачити реакцію споживачів на ті або інші товари або послуги можна лише володіючи максимумом інформації. Згідно з концепцією управління бізнес-процесами, яка є однією з течій в управлінні організацією, бізнес-процеси є ключовим ресурсом організації. Визначення моделі бізнес-процесів може допомогти краще зрозуміти специфіку, цілі та структуру організації. Він показує, як протікають процеси, які співробітники в них задіяні та які ситуації прийняття рішень пов'язані з ними. Це дозволяє аналізувати, як бізнес-цілі реалізуються в організації. Тут особливу роль відіграють програмні рішення, призначені для підтримки аналізу бізнес-процесів.

Інформаційні системи дозволяють виконувати запис подій, пов'язаних з виконанням бізнес-процесу, та показників, пов'язаних з оцінкою процесу, наприклад, час виконання завдання, затримки у виконанні процесу та витрати. Однак, тільки реєстрація подій може бути недостатньою, оскільки це лише дозволяє визначити поточний стан без визначення змін, що вносяться в процес, або їх наслідків. Таким чином, інформація про те, як в даний час працює бізнес-процес, повинна підкріплюватися знаннями про очікуваний вплив, який внесені зміни матимуть на майбутню діяльність організації. Шукаючи механізми аналізу та оцінки процесів, організації можуть отримати необхідні знання щодо рішень та їх впливу на функціонування. Відкриття знань про процеси є одним із елементів розвитку процесного підходу до функціонування організації.

Дослідження розвитку інформаційних систем підтримки прийняття управлінських рішень показали, що тут можна використовувати агентні технології. Під агентною платформою зазвичай розуміють набір програмних інтерфейсів, який надає можливості

створення, життєвого циклу, обміну повідомленнями, зв'язку та доступу до інформації та баз знань агентів [10]. Агентна платформа є найважливішою частиною в процесі створення агентної системи.

Таким чином, метою даної роботи є розробка та дослідження агентної платформи, яка може бути впроваджена в роботу компанії, зацікавленої в моделюванні та моніторингу бізнес-процесів в реальному часі.

## 2. Результати

Теорія організації та концепція процесного підходу до управління організацією вказують на те, що основним одержувачем процесу є користувач, а його погляд на бізнес-процес є найбільш важливим. Отже, використання програмних агентів в організаціях може підтримувати та вдосконалювати ці процеси. Програмний агент – це обчислювальний процес, який реалізує автономну комунікаційну функціональність програмного забезпечення. Агенти спілкуються за допомогою мови спілкування агента. Програмний агент є основоположним елементом агентної платформи, який поєднує одну або кілька можливостей обслуговування, опублікованих в описі послуги, в єдину та інтегровану модель виконання. Агент повинен мати хоча б одного власника, наприклад, виходячи з організаційної приналежності або власності людини, і агент повинен підтримувати хоча б один ідентифікатор агента (AID), який однозначно позначає агента. Програмний агент повинен мати такі властивості, як автономність, суспільне поведіння, реактивність, проактивність [10].

Багатоагентна система (Multi-agent system) – це система, яка утворена декількома взаємодіючими агентами. Для побудови агентно-орієнтованих систем запропоновано досить багато методологій і відповідних інструментальних засобів, призначених для автоматизації їх програмної реалізації [11]. Базовим інструментом розробки інтелектуальних багатоагентних систем, що дозволяє створювати, знищувати, інтерпретувати, запускати і переміщати агентів є агентна платформа. Основними функціями агентних платформ є: організація взаємодії агентів; передача повідомлень всередині платформи та між різними платформами; підтримка онтологій; управління агентами, їх життєвими циклами; пошук агентів і даних про них всередині системи; забезпечення безпеки агентів. На сьогодні методологічну основу створення агентної платформи визначають стандарти MASIF (Mobile Agent System Interoperability Facility) [12] та FIPA (Foundation of Physical Intelligent Agents) [13]. Метою стандарту MASIF є досягнення певного ступеня сумісності між платформами мобільних агентів різних виробників. Основними специфікаціями FIPA є стандарт управління агентами (Agent Management – AM) та стандартизована мова комунікації агентів

(Agent Communication Language – ACL). Стандарти FIPA надають базові визначення понять комунікації агентів. Агентна платформа представляє фізичну інфраструктуру, в якій можуть бути розгорнуті агенти. Структура агентної платформи не входить до стандартів FIPA та може базуватися на інших архітектурних підходах. Концепція агентної платформи дозволяє використовувати різні підходи до її організації архітектури програмного забезпечення.

Для проектування та реалізації агентних систем дуже важливо мати певний формальний спосіб опису та специфікації поведінки таких систем. Нажаль, ще досі немає точної формальної мови представлення агентів та агентної архітектури, що пов'язано з різноманіттям стилів та формалізмів, які для цього використовуються. Для визначення формальної архітектури агента позначимо зовнішнє середовище агента за допомогою множини станів  $S$ . Можливі дії агента описуються за допомогою множини дій  $A$ . Абстрактно агент може представлятися як функція

$$g_S : S \rightarrow A,$$

тобто вибір конкретної дії із множини можливих дій агент здійснює на основі поточного стану зовнішнього середовища  $s_i \in S$ . При цьому дії агента можуть впливати на середовище, але не контролювати його повністю. Для представлення агента зручно використовувати модель сприйняття зовнішнього середовища. Для цього вводиться множина можливих сприйнятих  $P$  та функція  $f : S \rightarrow P$ , яка описує, у який спосіб певні стани середовища сприймаються агентом. Тоді агент представляється за допомогою функції

$$g_P : P \rightarrow A,$$

тобто дія агента визначається у загальному випадку поточним сприйняттям стану зовнішнього середовища  $p_j \in P$ . При використанні підходів, заснованих на формальній логіці, функції сприйняття та вибору дії агента описується як набір тверджень, або правил, цієї логіки. Агент, який обирає дію на основі поточного сприйняття, ігноруючи всю історію попередніх сприйнятих, є простим рефлексним агентом. У багатьох випадках для успішного функціонування агента можуть знадобитися знання двох видів: 1) інформація про те, як середовище змінюється незалежно від агента; 2) знання про те, як власні дії агента впливають на середовище. Агент, який використовує такі знання про існування зовнішнього середовища, є рефлексним агентом, заснованим на моделі. Для розробки агентної платформи в даній роботі використовуються рефлексивні агенти, засновані на моделі.

На основі аналізу існуючих підходів до проектування агентно-орієнтованих програмних систем та специфікацій стандартів багатоагентних систем, були виділені підходи для побудови архітектури агентної

платформи та відповідні вимоги. Еталонна модель агентної платформи складається з наступних компонентів: 1) агент – це обчислювальний процес, який реалізує автономну комунікаційну функціональність програми; 2) фасилітатор каталогів, який надає послуги жовтих сторінок іншим агентам; 3) система управління агентом - обов'язковий компонент, який здійснює контроль за доступом до агентної платформи та його використанням 4) служба транспортування повідомлень - це метод зв'язку за замовчуванням між агентами на різних агентних платформах.

Функціонал програмного агента зображено на рисунку 1 у вигляді UML-діаграми прецедентів. Для даної системи рекомендовано да класи користувача. Адміністратор агентної платформи – користувач, який відповідає за працездатність та налаштування системи. Розробник агентної платформи – відповідає за розробку компонентів для вирішення задач необхідного домену.

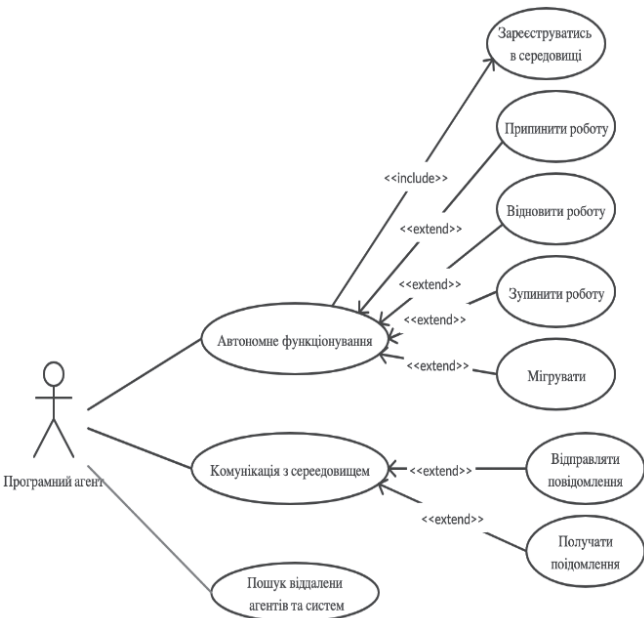


Рис. 1. Діаграма прецедентів програмного агента

Згідно із стандартом FIPA основна вимога агентної системи – це забезпечення здатності до перенесення програмного коду на різні платформи. Згідно із цією вимогою, було прийнято рішення використовувати JVM-середовище та мову програмування Kotlin.

Здатність агентів реагувати динамічно на несприятливі ситуації і події робить простішим розробку стійких розподілених систем. Наприклад, якщо вузол закінчує роботу, усі агенти, що виконуються на цій машині, попереджаються і їм надається час, щоб перейти на інший вузол і продовжити роботу зі збереженням попереднього стану. Підтримка роз'єданого функціонування та розподілена парадигма виключають деякі сценарії відмови працездатності і дозволяють пропонувати відмовостійкі характеристики.

Здатність агентів рухатися від однієї платформи до іншої в гетерогенному середовищі зумовлена використанням віртуальних машин та інтерпретаторів. Віртуальні машини і інтерпретатори, проте, можуть запропонувати тільки обмежену підтримку збереження і відновлення стану через різницю реалізацій. Традиційні техніки опрацювання помилок недостатні для агентної парадигми. Наприклад, копіювання стану в контрольних точках до і після прибуття, і на завершенні певних транзакцій або подій, може бути потрібне, щоб гарантувати відповідне повернення до початкового (без помилки) стану. Однак, з кожною контрольною процедурою або механізмом збереження відмовостійкості збільшується навантаження на систему.

Для проектування функціональних та нефункціональних вимог, було розглянуто аналоги та сформульовано наступні вимоги до прототипу багатоагентної системи: 1. Забезпечення здатності до перенесення коду на різні платформи. 2. Забезпечення роботи агентів у гетерогенному комп'ютерному середовищі. 3. Підтримка мережевої взаємодії. 4. Багатопоточна обробка. 5. Безпека.

На рисунку 2 зображені функціональні та нефункціональні вимоги до програмного забезпечення у вигляді діаграми вимог в нотатції UML. Дані вимоги певною мірою відображають вимоги стандарту FIPA. Вимоги до зовнішнього інтерфейсу включають: JVM-середовище та комплект розробника застосунків (JDK) на мові Java, який містить компілятор Java (javac), стандартні бібліотеки класів Java не менш ніж 8 версії. Крім цього, необхідні бібліотеки розробника застосунків для Kotlin (Kotlin JDK) та середовище виконання (Kotlin JRE). Для організації запуску декількох агентів одночасно, а також їх асинхронного керування використовується пакет розробки співпрограм Kotlin-coroutines.

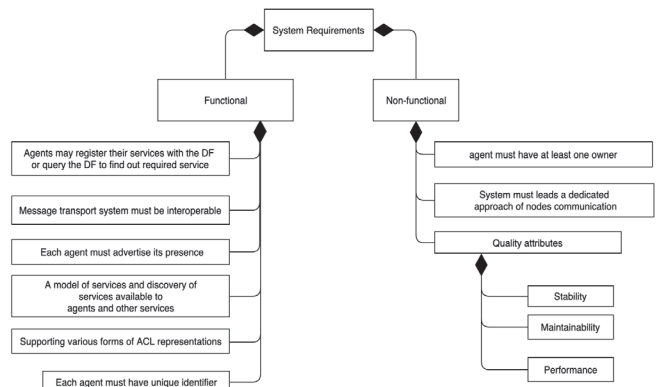


Рис. 2. Діаграма вимог ПС

Основні компоненти та процес ініціалізації агентів зображено на рисунку 3 у вигляді UML-діаграми компонентів.

Архітектура побудованої системи чітка і чиста. Відповідно до стандартної системи FIPA, поточна

система повинна будуватися як виділений сервер, де кожен агент є автономною складовою системи. Інтерфейс Agent є основною складовою агентно-орієнтованої платформи. Він містить у собі базові поля, які повинен мати кожен елемент платформи, а саме: ім'я агента (name), ідентифікатор (identifier), ємність (capacity), та посилання на батьківський елемент (parent). Інтерфейс Directory Facilitator (DF) є керуючою сутністю, за допомогою якої з'являється можливість керувати групою агентів та їх сервісами. DF реалізує сервіс жовтих сторінок у агентній платформі. Інтерфейс Agent Management System надає змогу створити реалізацію системи управління агентом (AMS), яка є обов'язковою частиною агентної платформи. Через AMS відбувається реєстрація агентів у системі та надання їм унікального ідентифікатора. Інтерфейс Message Transport Service (MTS) є контрактом для створення MTS в агентній платформі, що забезпечує зв'язок та передачу агентів між різними агентними платформами. Інтерфейс Behaviour запропоновано для забезпечення контракту між різними агентами на відповідну поведінку при отриманні різних повідомлень.

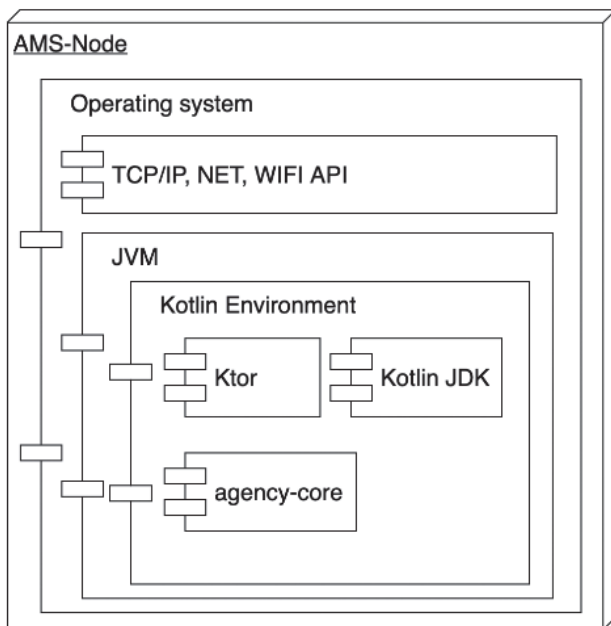


Рис. 3. Діаграма компонентів бібліотеки agency.kt

Розглянемо більш детально розроблені класи агентної платформи. Клас BaseAgent - це реалізація інтерфейсу Agent, яка відповідає звичайному агенту в системі. Він може приймати та відсилати повідомлення та користуватися сервісами, до яких має доступ. Також містить у собі реалізацію необхідних методів для співпрограм. Клас BaseDFAgent - це реалізація інтерфейсу Directory Facilitator який реалізує сервіс жовтих сторінок та контроль за агентами, для яких він є предком. Він містить список агентів та реалізує доступ до них. Також реалізовані методи для роботи з співпрограмами. Клас MessageTransportServiceImpl

є реалізацію інтерфейсу Message Transport System, яка містить реалізацію всіх необхідних методів для обміну повідомленнями у режимі багатонитковості. Клас AgentManagementSystemImpl - це реалізація інтерфейсу AgentManagementSystem, яка надає змогу створювати та реєструвати нових агентів. Також реалізовано пошук агентів у системі і сервіс білих сторінок. Клас AgentPlatform - це клас, який містить у собі всі елементи агентної платформи та є її фізичним представленням. Клас Message - це клас, за допомогою якого здійснюється передача даних, він містить у собі адресу відправника, адресу отримувача, час відправки та дані для передачі.

Для реалізації прототипу агентної платформи було обрано об'єктно-орієнтовану мову програмування Java, статично типізовану мову програмування Kotlin, яка працює поверх JVM. Розроблено базис предметно-орієнтованої мови програмування (Domain-specific language, DSL) з урахуванням вимог реалізації агентної платформи. Під час створення DSL мовою програмування загального призначення Kotlin, не створюється самостійний синтаксис, а налаштовується конкретний спосіб використання наявної мови. Це дає перевагу додавати до розробленої DSL інші можливості Kotlin. Крім того, Kotlin пропонує декілька способів створити чистіший синтаксис і уникати використання занадто багато зайвих символів: використання лямбда виразів поза круглими дужками методу, лямбда вирази з приймачами, а також функції розширення. Суттєвою перевагою обраної технології є використання пакету розробки співпрограм Kotlin-coroutines.

Таким чином, на основі проведеного аналізу існуючих підходів конструювання багатоагентних програмних систем і програмних компонентів агентної платформи було розроблено прототип агентної платформи на основі використання формальних методів проектування багатониткових систем з використанням мови програмування Kotlin. Відповідно до визначених вимог, для оцінки прототипу агентної платформи пропонується оцінити такі параметри, як обсяг виділеної оперативної пам'яті, обсяг навантаження процесора та кількість виділених потоків. Задля цього сформовано умовний приклад, який детально розглянуто у наступному розділі.

### 3. Тестування прототипу агентної платформи

У якості умовного прикладу розглянемо наступну постановку задачі. Дано два типи користувачів інформаційної системи умовної організації: замовник та виконавець. Кожен замовник формує множину вимог завдання, яке необхідно виконати. Кожен виконавець характеризується множиною обмежень щодо можливостей виконання по кожному типу завдань, які може виконувати організація. Вимоги до завдань

та обмеження можливості їх рішень задані системою предикатних виразів та зберігаються у замовника та виконавця відповідно. Необхідно змоделювати багатоагентну систему комунікації замовників та виконавців так, щоб при додаванні в систему виконавця кожний замовник мав змогу «домовитись» із новим виконавцем. Відповідно, при додаванні замовника, кожний виконавець мав змогу «домовитись» про виконання нового завдання. Визначемо, що кожний замовник та кожний виконавець мають формувати власний список виконавців і замовників, які відповідають або ні їх вимогам та обмеженням.

На рисунку 4 наведено діаграму компонентів реалізації багатоагентної системи на основі прототипу агентної платформи.

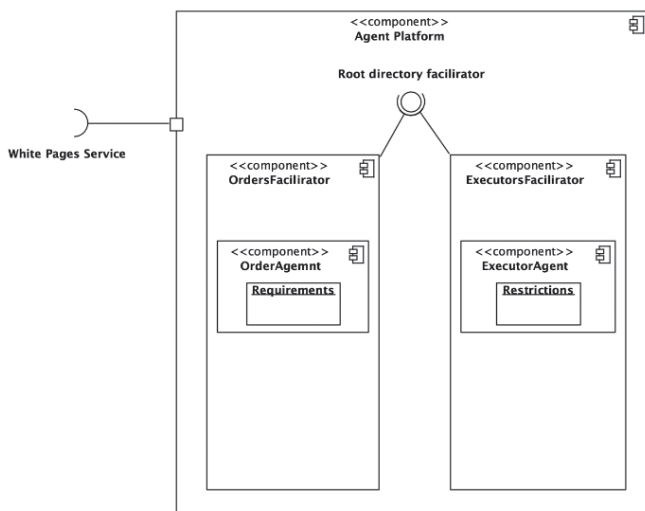


Рис. 4. Діаграма компонентів багатоагентної системи

Компонент OrdersFacilator містить набір зареєстрованих у ньому агентів-замовників OrderAgents. Кожне замовлення після отримання повідомлення від виконавця перевіряє відповідність вимогам, щоб забезпечити «прийняття» або «відмову». Компонент ExecitorsFacilator містить набір зареєстрованих у ньому агентів-виконвців ExecutorAgent. Поведінка агента виконавця схожа на OrderAgent, але замість вимог він містить набір обмежень. Якщо обмеження відповідають вимогам замовлення, агент надсилає повідомлення про прийняття, або повідомлення про відмову в протилежному випадку. Кожен агент містить список відповідних ідентифікаторів агентів, від яких вже отримано повідомлення.

Діаграма класів поведінки агентів залежно від типу агента представлена на рисунку 5. Порядок та поведінка агентів майже однакові, але кінцеві точки пошуку відповідного агента для забезпечення «прийняття» різні.

Код запуску агентної платформи представлено на рисунку 6. Агентна платформа містить два каталізатори каталогів («df»), які названі як «producers» та «consumers». Кожен з них має локальний ідентифікатор: «PC@main@producers» та «PC@main@consumers»

відповідно. Кожен з них має набір агентів з визначеною поведінкою.

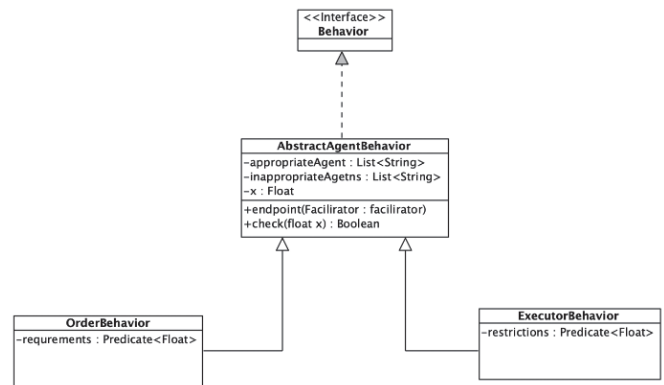


Рис. 5. Діаграма класів поведінки агентів

Основна мета експерименту - перевірити параметри продуктивності розробленої системи. Тому буде виконувати тестування навантаження (об'єм виділеної пам'яті, кількість операцій, аналіз CPU) для оцінки розробленої агентної платформи. Середовище виконання: MacBook Pro, процесор: 2.2 GHz Intel Core i7, об'єм оперативної пам'яті: 16 Гб 2400 MHz DDR4, відео-карта: Radeon Pro 555X 4 GB (інтегрована), Intel UHD Graphics 630 1536 Мб (дискретна).

```
import common.implementation.AgentPlatform
import kotlin.coroutines.delay
import task.ConsumerAgentBehaviour
import task.ProducerAgentBehaviour

fun main() {
    AgentPlatform.initialize("PC") {
        df("producers") {
            for (i in 0..20) {
                agent(name = "${System.nanoTime()}", behaviour =
                    ProducerAgentBehaviour(-10f + 20f * Math.random().toFloat()))
            }
        }
        df("consumers") {
            for (i in 0..10) {
                agent(name = "${System.nanoTime()}", behaviour =
                    ConsumerAgentBehaviour(-10f + 20f * Math.random().toFloat()))
            }
        }
    }
}
```

Рис. 6. Лістинг коду запуску агентної платформи

У першому експерименті обидва каталізатори каталогів містять 4 агенти. Результат виконання модельного прогону представлено на рисунку 7.

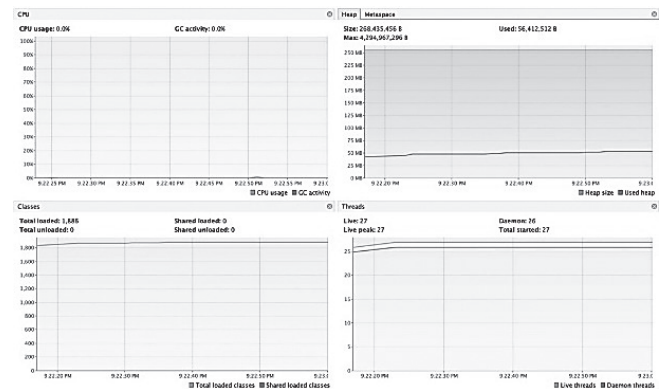


Рис. 7. Результати першого експерименту

У другому експерименті обидва каталізатори каталогів містять тисячу агентів. Результат виконання другого модельного прогону представлено на рисунку 8.

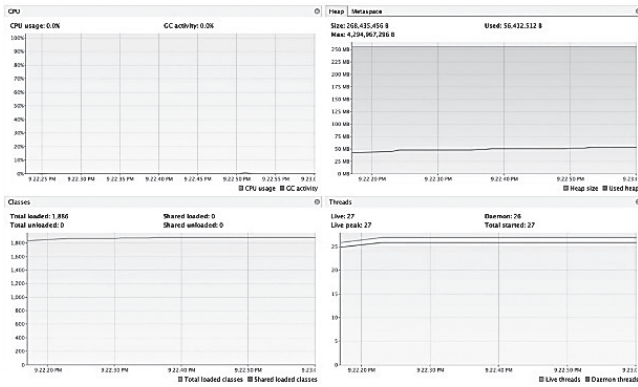


Рис. 8. Результати другого експерименту

У третьому експерименті обидва каталізатори каталогів містять мільйон агентів. Результат виконання третього прогону представлено на рисунку 9.

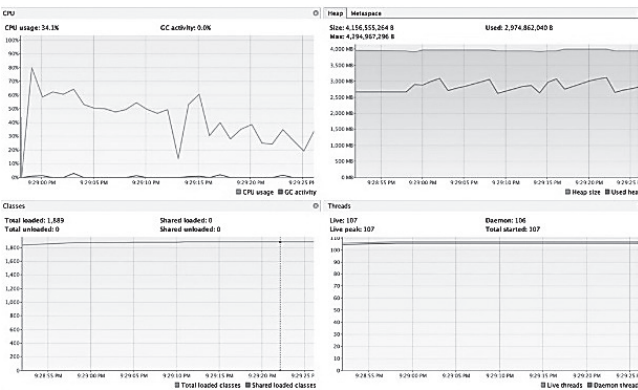


Рис. 9. Результати третього експерименту

Результати трьох експериментів наведено у таблиці 1. Аналіз отриманих оцінок показує, що навіть при двох мільйонах створених агентів, використання процесора було у середньому близько 34 відсотки, а максимальне використання процесора – 65%. Це підтверджує припущення щодо реалізації архітектури багатоагентної системи. Основним недоліком такого підходу є те, що пам'ять, яка використовується 2 мільйонами корутинів, становить у середньому 3,5 Гб. Якщо кількість агентів збільшиться, системі буде потрібно більший об'єм JVM-heap, ніж дозволений розмір, що може створити виключення OutOfMemory. Таким чином, можна зробити висновок, що кількість агентів є головним параметром, який впливає на надійність та ефективність розробленої агентної платформи.

Таблиця 1

Результати експериментів

Експеримент	Кількість агентів	Кількість потоків (ниток) виконання	Використана пам'ять	CPU
1	8	27	268MB	0.03-1%
2	1000	56	1.2GB	5-10%
3	1000000	107	4.0GB	32-67%

Таким чином, за результатами проведених експериментів можна зазначити, що завдяки тому, що розроблена агентна платформа agent.kt використовує корутини для опису агентів та каталізатору каталогів - надійність цього компоненту вище, ніж JADE або інших аналогічних агентних платформ. Оскільки запропонована архітектура використовує неблокуючу структуровану багатонитковість і не використовує рефлексію виконання для синхронізації функцій вводу/виводу повідомлень та розподілу пам'яті, розроблене рішення демонструє певні переваги в контексті навантаження центрального процесора та використання пам'яті. З урахуванням технічних обмежень середовища тестування, можна зазначити, що розроблений прототип задовольняє висунутим вимогам та результати тестування можна вважати задовільними.

Висновки

Проведено аналіз існуючих підходів конструювання багатоагентних програмних систем і програмних компонентів агентної платформи. Розроблено прототип агентної платформи на основі використання формальних методів проектування багатониткових систем з використанням мови програмування Kotlin. Згідно із результатами тестування розроблений прототип має переваги в порівнянні із вже існуючими рішеннями з точки зору навантаження процесора та використання пам'яті. Зроблено висновок, що кількість агентів є головним параметром, який впливає на надійність та ефективність розробленої агентної платформи.

Сформовано підхід до побудови програмної реалізації багатоагентної системи для інтелектуального аналізу бізнес-процесів, що дозволяє в режимі реального часу вирішувати завдання побудови організаційної структури робіт та моніторингу ефективності бізнес-процесів в умовах динамічного бізнес-оточення. Розроблено прототип моделі спільноти агентів на основі специфікації FIPA, що дозволяє підвищити продуктивність, масштабованість та інтеоперабельність програмних рішень автоматизації бізнес-процесів.

Список літератури

- [1] *W.M.P. van der Aalst*. Process Mining: Data Science in ActionAalst. – Berlin: Springer-Verlag, 2016. – 466 p.
- [2] *Garcia, Cleiton dos Santos et al*. Process Mining Techniques and Applications – A Systematic Mapping Study. // Expert Systems with Applications. - 1 Nov., 2019. - 260–295.
- [3] *Dumas, M., La Rosa, M., Mendling, J., & Reijers, H. A*. Fundamentals of Business Process Management. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [4] *Darane Pimchangthong, Veera Boonjing*. Effects of Risk Management Practice on the Success of IT Project 7th International Conference on Engineering, Project, and Production Management Procedia Engineering 182, 2017. – 579- 586.

- [5] *Ciric D, Bojan Lalica, Danijela Gracanina, Nemanja Tasica, Milan Delica, Nenad Medica* Agile vs. Traditional Approach in Project Management: Strategies, Challenges and Reasons to Introduce Agile 25th International Conference on Production Research Manufacturing Innovation: Cyber Physical Manufacturing vol. 39, 1407-1414, 2019.
- [6] *Nader Ale Ebrahim, Shamsuddin Ahmed and Zahari Taha.* Australian Virtual Teams: a Literature Review Journal of Basic and Applied Sciences , 3(3): 2653-2669, 2009.
- [7] *Weimann P., Christian H. E. Scott and Pollock M.* Changing the Communication Culture of Distributed Teams in a World Where Communication is Neither Perfect nor Complete. The Electronic Journal Information Systems Evaluation Volume 13 Issue 2 2010, 187-196.
- [8] *Y. Lin et al.* Multi-Agent System for intelligent Scrum project management. // Integrated Computer-Aided Engineering. - Vol. 22, 2015. – 281-296.
- [9] *Чалый С. Ф.* Формирование набора ограничений в задаче предварительной обработки неструктурированных журналов регистрации событий / С. Ф. Чалый, Е. О. Богатов, А. Ю. Кальницкая // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ». – Харьков : НТУ «ХПИ». – 2013. – № 2 (976). – С. 139-148.
- [10] Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software / ameera Abar, Georgios K. Theodoropoulos, Pierre Lemarinier, Gregory M.P. O’Hare // Computer Science Review –S.Computer Science Review 24, 2017 – 13-33.
- [11] *Dorri, Ali & Kanhere, Salil & Jurdak, Raja.* Multi-Agent Systems: A survey. 2018. IEEE Access. 1-1. 10.1109/ACCESS.2018.2831228.
- [12] *Milojicic, D., Breugst, M., Busse, I. et al.* MASIF: The OMG mobile agent system interoperability facility. Personal Technologies 2, 117–129 (1998). <https://doi.org/10.1007/BF01324942>
- [13] *Poslad, Stefan, and Patricia Charlton.* Standardizing agent interoperability: The FIPA approach. ECCAI Advanced Course on Artificial Intelligence. Springer, Berlin, Heidelberg, 2001.

*Надійшла до редколегії 15.04.2020*



Білоус Н.В.<sup>1</sup>, Рассоха О.В.<sup>2</sup>, Агекян І.А.<sup>3</sup>, Грамм О.В.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Професор кафедри програмної інженерії, доцент, ORCID ID 0000-0002-8850-9316

Харківський національний університет радіоелектроніки,

м. Харків, Україна, nataliya.bilous@nure.ua

<sup>2</sup>Студент кафедри програмної інженерії, ORCID ID 0000-0002-6673-1119

Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна, olha.rassokha@nure.ua

<sup>3</sup>Асистент кафедри програмної інженерії, ORCID ID 0000-0002-9414-9775

Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна, iryna.ahekian@nure.ua

<sup>4</sup>Аспірант кафедри програмної інженерії, ORCID ID 0000-0003-0657-717X

Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна, oleh.hramm@nure.ua

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ДЛЯ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ РОЗПІЗНАВАННЯ ЕМОЦІЙ ТА ВИЗНАЧЕННЯ СТАНУ ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ

Для визначення загального стану здоров'я людини за допомогою розпізнавання емоцій було обрано метод, який базується на машинному навчанні, класифікатор натренований на датасеті «fer2013» та «PAB-F». Було порівняно два способи визначення відчуття болю: визначення відчуття болю за наявності сильних негативних емоцій та використання для тренування нейронної мережі датасету, з зображеннями людей, поділеними на класи «боляче» - «не боляче». Для датасету «fer2013», щоб визначити наявність болю необхідна після обробка даних. Як правило біль виражається у інтенсивній та тривалій наявності емоції злості та суму. Інтенсивність емоції пропонується вимірювати коефіцієнтом ймовірності визначення емоції, який повертає нейронна мережа. Експериментально визначено, що спеціалізований набір даних краще справляється з поставленою задачею, не дивлячись на те, що має достатньо малу кількість зображень. «fer2013» має високий відсоток помилкового спрацювання. Це можна пояснити тим, що на фотографіях були також явні негативні емоції, які розцінювалися як біль. Кількість епох навчання позитивно впливає на точність нейронної мережі, а збільшення швидкості навчання – негативно. Для перевірки точності роботи нейронних мереж на вхід до модуля перевірки емоційного стану на вхід подавалися зображення знайдені за пошуковим запитом «Гримаса болю» на ресурсі depositphotos.

РОЗПІЗНАВАННЯ ЕМОЦІЙ, ОЦІНКА СТАНУ ЗДОРОВ'Я, КОМП'ЮТЕРНИЙ ЗІР, НЕЙРОННІ МЕРЕЖІ, ДАТАСЕТ, FER2013, PAB-F

Для определения общего состояния здоровья человека с помощью распознавания эмоций был выбран метод, основанный на машинном обучении, классификатор натренован на датасетах «fer2013» и «PAB-F». Было сравнительно два способа определения ощущение боли: определение ощущение боли при наличии сильных негативных эмоций и использования для тренировки нейронной сети датасета с изображениями людей, разделенными на классы «больно» - «не больно». Для датасета «fer2013», чтобы определить наличие боли необходима после обработка данных. Как правило боль выражается в интенсивной и длительной наличии эмоции злости и печали. Интенсивность эмоции предлагаю измерять коэффициентом вероятности определения эмоции, возвращающий нейронная сеть. Экспериментально установлено, что специализированный набор данных лучше справляется с поставленной задачей, несмотря на то, что имеет достаточно малое количество изображений. «Fer2013» имеет высокий процент ложного срабатывания. Это можно объяснить тем, что на фотографіях были также явные негативные эмоции, которые расценивались как боль. Количество эпох обучения положительно влияет на точность нейронной сети, а увеличение скорости обучения - отрицательно. Для проверки точности работы нейронных сети на вход к модулю проверки эмоционального состояния на вход подавались изображения найдены по поисковому запросу «Гримаса боли» на ресурсе depositphotos.

РАСПОЗНАВАНИЕ ЭМОЦИЙ, ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ЗДОРОВЬЯ, КОМПЬЮТЕРНОЕ ЗРЕНИЕ, НЕЙРОННЫЕ СЕТИ, ДАТАСЕТА, FER2013, PAB-F

To determine the general state of human health using emotion recognition, a method based on machine learning was chosen, the classifier is trained on the dataset “fer2013” and “PAB-F”. negative emotions and the use of a dataset to train the neural network, with images of people divided into classes “painful” - “not painful”. For the “fer2013” dataset, it is necessary to determine the presence of pain after data processing. As a rule, pain is expressed in the intense and prolonged presence of emotions of anger and sadness. I suggest measuring the intensity of emotion by the probability factor of determining the emotion, which returns the neural network. It has been experimentally determined that a specialized data set better copes with the task, despite the fact that it has a sufficiently small number of images. “Fer2013” has a high percentage of false positives. This can be explained by the fact that the photos also showed obvious negative emotions, which were regarded as pain. The number of learning epochs has a positive effect on the accuracy of the neural network, and the increase in learning speed has a negative effect. To check the accuracy of the neural network at the entrance to the module to check the emotional state at the entrance were images found by the search query “Pain grimace” on the resource depositphotos.

EMOTION RECOGNITION, HEALTH ASSESSMENT, COMPUTER VISION, NEURAL NETWORKS, DATASET, FER2013, PAB-F

**Вступ**

Розповсюдження камер через мільярди споживчих пристроїв привело до різкого збільшення числа записаних відео, завантажених в соціальних мережах і веб-сайтах обміну відео. Це в свою чергу, стимулювало інтерес в області афективних обчислень, а також машинного навчання і комп’ютерного зору в наукових співтовариствах тож зараз існує багато підходів та алгоритмів аналізу відео та фото матеріалів. Мета роботи – дослідити методи для розробки програмної системи розпізнавання емоцій та визначення стану здоров’я людини. Впровадження нових інформаційних технологій у медицину породжує перехід від традиційних медичних інформаційно-пошукові системи в інтелектуальних комп’ютерних системах для підтримки прийняття рішень в медицині з передовим математичним апаратом та елементами експертних систем, здатних контролювати діагностичні критерії, побудова передових комп’ютерних діагнозів, впровадження та управління процесом лікування [1].

Об’єкт дослідження – розпізнавання емоцій та визначення стану здоров’я людини. Предмет дослідження – методи для розробки програмної системи розпізнавання емоцій та визначення стану здоров’я людини. Протягом декількох років дослідники критикують поняття, що міміка може легко показати почуття людини. Група вчених з Асоціації психологічних наук провела два роки, вивчаючи більше тисячі наукових праць з розпізнавання емоцій. Вони були в основному зосереджені на тому, як вираз обличчя людини змінюється, коли вона відчуває певні емоції, і як вони трактуються іншими людьми.

Автоматизовані системи (АС) для підтримки прийняття рішень у медичній діагностиці зумовлені низкою причин. Однією з таких причин є необхідність швидкої діагностики в рекреаційній медицині, наприклад, при контролі спортивних навантажень із використанням сучасних мобільних додатків. У таких випадках виникає ситуація, коли для вирішення питання зменшення навантаження або коригування стану пацієнта за допомогою медичних методів та алгоритмів вирішення потрібна висока працездатність та надійність [2-3].

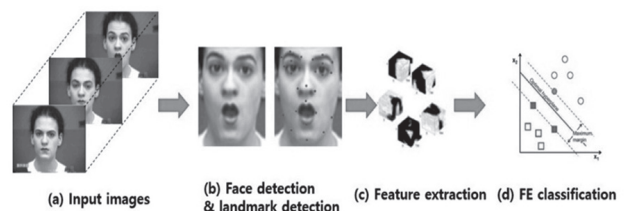
Методика дистанційного моніторингу емоцій та стану здоров’я людини за допомогою звичайних камер матиме багато потенційних застосувань. Зміни кольору шкіри, викликані серцевим пульсом, можуть бути зняті звичайними камерами. Зміни викликані болем явно можна побачити на обличчі. Тож пропонується порівняти різні датасети для визначення емоцій, зокрема того, чи відчуває людина біль.

**1. Аналіз методів розпізнавання емоцій для визначення стану здоров’я**

Найпростіший спосіб визначити емоцію людини за обличчям ґрунтується на класифікації ключових

точок (facial landmarks), координати яких можна отримати за допомогою різних алгоритмів PDM, CML, AAM, DPM або CNN. Зазвичай відзначають від 5 до 68 точок, прив’язуючи їх до положення брів, очей, губ, носа, підборіддя, що дозволяє частково захоплювати міміку. Нормовані ключові точки координат можна безпосередньо подати класифікатор (наприклад, SVM або Random Forest) і отримати основне рішення [4].

Просте використання координат без візуальних компонентів призводить до значної втрати корисної інформації, тому для поліпшення системи в цих точках Обчислюються різні дескриптори: LBP, HOG, SIFT, LATCH. Принцип роботи алгоритму показано на рис. 1.



**Рис. 1. Принцип роботи алгоритму розпізнавання ключових точок**

У своїй статті американські вчені досліджували різні зображення обличчя, отримані від ААМ для виявлення болю на обличчі. Вони дослідили два важливі питання щодо автоматичного виявлення болю. По-перше, як слід зобразити обличчя, враховуючи, що доступна нежорстка реєстрація обличчя? По-друге, на якому рівні (тобто на основі послідовностей або кадрів) слід мати один набір даних міток для вивчення автоматичного детектора болю?

Щодо першого питання науковці продемонстрували, що значну користь можна отримати від нежорстких, а не жорстких реєстрацій обличчя. Зокрема, вони продемонстрували, що роз’єднання обличчя на окремі нежорсткі компоненти форми та зовнішнього вигляду забезпечує значне поліпшення продуктивності порівняно з тими, які просто нормалізуються для жорсткої зміни зовнішності (наприклад, просто розміщення очей та нормалізація для перекадру, обертання та масштабу) . Цей результат є вагомим, оскільки в більшості провідних методик блоку дій та болю виявлення застосовують жорсткі, а не нежорсткі реєстрації обличчя [5].

Попередні дослідження з відповідями на фільтри Габора, наприклад, використовували жорстку реєстрацію. Хоча жорстка реєстрація може бути адекватною для деяких застосувань (наприклад, поведеної в поведінці або спонтанної поведінки з невеликим рухом голови поза площиною), для інших вона виявляється, що це не так. Інші дослідження виявили, що жорсткі реєстрації зовнішнього вигляду мали невелику інформаційну цінність у відео з клінічних оцінок болю.

Нежорстке оформлення зовнішнього вигляду значно покращило продуктивність класифікатора. Результати свідчать, що тип реєстрації (жорстка проти нежорстка) може впливати на інформаційну цінність та надійність особливостей зовнішності. Оцінюючи особливості, важливо враховувати питання позачергової ротації та типи реєстрації [6].

Littlewort спочатку виявляв одиниці дії, а потім використовував (передбачувані) дії в класифікаторі для виявлення болю. Дослідження на цю тему тільки починаються.

Більшість попередніх досліджень з виявлення чи розпізнавання виразів обмежувались поставленою поведінкою та описом міміки (наприклад, підрозділи дії чи вирази, що стосуються емоцій, наприклад, щасливі чи сумні). Наука лише починає вирішувати більш складне питання виявлення суб'єктивних станів, таких як клінічний або викликаний біль.

Людським спостерігачам важко досягти високого рівня надійності і класифікатори, що навчаються на даних, позначених міткою спостерігачів, впливають на джерело відхилення помилок.

Крім того, в тій мірі, в якій виявляються конкретні відчуття на обличчі, класифікатори другого порядку можуть мати перевагу.

Підводячи підсумок, у дослідженні клінічного виявлення болю дослідники виявили, що поєднання не жорстко зареєстрованого вигляду та подібності нормалізованої форми максимізувало виявлення болю як на рівні послідовності, так і на рівні кадру. Навпаки, жорстко зареєстрований вигляд мав мало значення при виявленні болю на рівні послідовності чи кадрів [7].

Ці результати мають наслідки для виявлення болю та загального машинного навчання. Оскільки маркування на рівні послідовності забезпечує збір більших наборів даних, майбутня робота може розглянути гібридні стратегії, що поєднують мітки на рівні послідовностей та кадрів для подальшого покращення виявлення болю та емоція. Сучасні результати досліджень у клінічних болях свідчать про можливість автоматичного виявлення болю в медичних умовах.

Для створення класифікатора, достатньо взяти будь-яку нейронну мережу з базовою архітектурою, попередньо навчену на великому наборі даних емоцій, і перетренувати останні кілька шарів. Таким чином, можливо отримати гарне основне рішення для класифікації емоцій [8]. Але, знімки не точно відображають справжні емоції, що людина переживає в цій ситуації. Тому для підвищення точності необхідно аналізувати послідовність кадрів. Є два способи вирішення цієї задачі.

Перший спосіб аналізу послідовності кадрів полягає в тому, що високо-рівневі ознаки, які класифікують кожен кадр подаються в рекурентну нейронну мережу (наприклад, LSTM) для захвату короткострокової складової. Приклад роботи цього способу показаний на рис. 2.

Другий спосіб полягає в безпосередній передачі послідовності кадрів, взятих з відео з деяким кроком, до 3D-CNN. Такі нейронні мережі, як CNN використовують згортки з трьома ступенями свободи, які перетворюють чотиривимірні карти у тривимірні карти ознак. Алгоритм цього способу показаний на рис. 3 [9].

У мімічних реакціях кожної людини є певний набір стандартних параметрів які ділиться на дві категорії: геометричний і поведінковий. Для опису кількісних і якісних параметрів людини використовують систему кодування лицьових рухів. Відео потік даних є послідовним набором кадрів. Метою розпізнавання є об'єднання зображень обличчя у в класи, які не перетинаються [9].

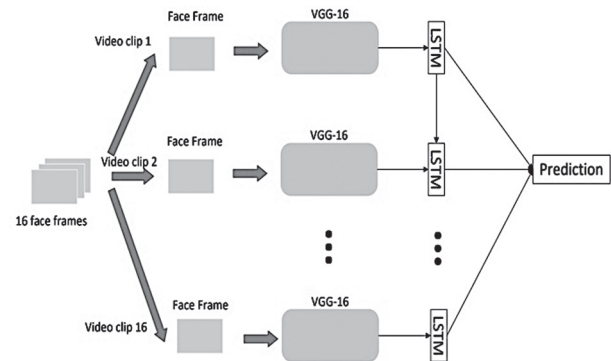


Рис 2. Класифікація ознак за допомогою рекурентної нейронної мережі

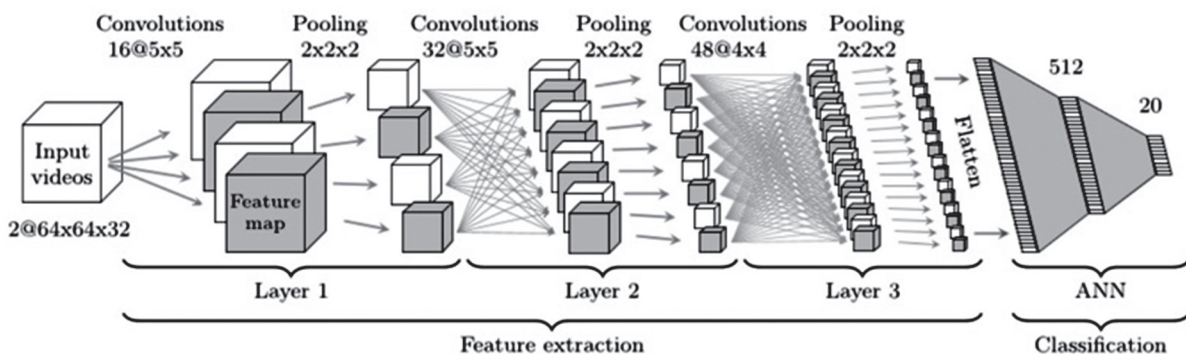


Рис. 3. Аналіз послідовності кадрів з використанням 3D-CNN

Однією із проблем такого методу раніше була недостатня кількість даних для тестового набору, але зараз з'явилась велика кількість наборів різного контексту та призначення. Але зараз деякі дослідження стверджують, що алгоритми простого «зчитування» внутрішніх станів людей лише з аналізу їхніх рухів обличчя, без урахування різних аспектів контексту, не можуть бути повністю достовірними.

Пошук розв'язку виконується за допомогою штучних нейронних мереж. Інваріант – це властивість певного класу (множини) математичних об'єктів, які залишаються однаковими під час певного типу перетворення. Інваріантні моменти – це характерні ознаки, які можуть зустрічатися у кожному зображенні. Найчастіше люди на відеокадрах піддаються різним деформаціям, характерним для міміки людини [7].

Розв'язання задачі розпізнавання емоцій вважається задачею класифікації, тобто нейронна мережа повинна співставити отриманий набір даних з емоцією, яка відповідає заданому набору параметрів. Вся вибірка поділена на дві підмножини, які не пересікаються: навчальну та тестову. Після навчання штучної нейронної мережі перевіряється якість її навчання на тестовій множині. Нейронна мережа повинна бути настроєна так, щоб при подачі вектору ознак, який відноситься до класу А мережа видавала значення «1» на виході класу А, а на всіх інших виходах «0». Це досягається настройкою мережі методом зворотного поширення помилки: ініціалізація ваги зв'язків: невеликі, випадкові значення та максимальна середньоквадратична помилка; подавання на вхід нейронної мережі вертор; розповсюдити сигнали до прямих зв'язків; обчислення похибок і похибки вихідного шару нейронів; розрахунок похибки внутрішнього шару нейронів; оновлення ваги зв'язку кожного шару. Алгоритм навчання нейронних мереж: елементи навчальної послідовності подаються на вхід до мережі по одному; елементи тренувальної послідовності порівнювалися з цільовими (бажаними) значеннями; обчислюється функціонал помилки; начення функціоналу та його градієнту використовуються для регулювання вагів. Операції повторюються, доки не виконається певна кількість циклів або доки помилка не зменшиться [8].

У ході дослідження було використано датасети «fer2013» та «PAV-F». Датасет «fer2013» складається з 48x48 піксельних зображень у градаціях сірого. Обличчя були автоматично розміщені так, щоб бути більш-менш по центру і займати приблизно однаково місця в кожному зображенні.

Завдання полягає в категоризації кожної фотографії на основі емоцій, показаних у виразі обличчя в один з семи категорій (0 = злість, 1 = огида, 2 = страх, 3 = щастя, 4 = сум, 5 = здивування, 6 = нейтральні). CSV містить два стовпці, «емоція» та

«пікселі». Стовець «емоція» містить числовий код, що варіюється від 0 до 6 включно, відповідно емоції, яка присутня на зображенні. Стовець «пікселі» містить рядок, оточений лапками для кожного зображення. Вміст цього рядка – значення пікселів, розділені пробілами. Test. CSV містить лише стовпець «пікселі», і завдання полягає в тому, щоб передбачити емоцію колонки. Навчальний комплект складається з 28 709 прикладів. Публічний набір тестів, складається з 3 589 прикладів [9].

«PAV-F» датасет складається з 320x240 кольорових зображень. Як і у «fer2013» обличчя розміщені так більш-менш по центру, але вони займають різну площу зображення. Завдання полягає в категоризації кожної особи на основі на основі виразу обличчя у одну із таких категорій (0 = не боляче, 1 = дискомфортно, 2 = середній біль, 3 = сильний біль, 4 = дуже сильний біль). Датасет – категоризовані зображення людини розділені по директоріям. Навчальний комплект складається з 1200 прикладів. Набір тестів, складається з 50 прикладів [10].

Для визначення стану здоров'я достатньо тільки негативного спектру емоцій, тобто другої та третьої чверті графіку повного спектру емоцій, показаного на рис. 4. Якщо емоція знаходиться у першій або четвертій чверті, вона не має впливати на результат. Навряд чи можна зберегти гарний настрій, якщо ви постійно відчуваєте біль різного ступеня інтенсивності. Але навіть якщо ви приймаєте ліки, ви все ще можете бути схильні до перепадів. Біль може виражатися такими емоціями, як злість та сум. При цьому емоція дуже інтенсивна [10].

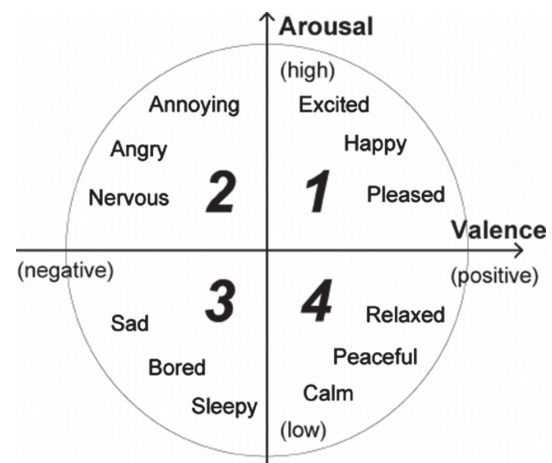


Рис. 4. Повний спектр емоцій

Психолог Miris Kunz університету Монреалю досліджував взаємозв'язок між болем і виразом обличчя. Протестовані двадцять жінок і двадцять чоловіків у віці від 18 до 30 років. На ногах піддослідних були пов'язки, які можуть виробляти тепло. Коли піднялася температура, добровольці, які брали участь в експерименті, продемонстрували ступінь ступінь дискомфорту, а вираз їхніх обличчя був сфотографований.

Звичайно, Kunz в його дослідженні брав до уваги те, що кожна людина має свій рівень больового порогу. Експеримент показав, що больовий поріг безпосередньо впливає на скорочення лицьових м'язів. Іншими словами, чим інтенсивніша гримаса тим вище степінь відчуття болю [11].

## 2. Результати досліджень

Аналіз емоцій відбувається наступним чином, спочатку отриманий кадр обробляється та фільтрується, потім фільтровані дані аналізуються нейронною мережею. Нейронна мережа повертає емоцію та її ймовірність, чим інтенсивніша емоція відчуває людина, тим більше ймовірність. Позитивні емоції відкидаються одразу. Для відчуття болю характерні сильні, інтенсивні емоції. Алгоритм визначення відчуття болю через емоції показано на діаграмі станів на рис. 5. Діаграма станів – орієнтований граф для кінцевого автомата, в якому: вершини позначають стани, а дуги показують переходи між двома станами.

У кожного з поданих датасетів є свої переваги і недоліки: «fer2013» має значно більший навчальний комплект, а «PAV-F» більше підходить тематично. Порівняння датасетів показано на таблиці 1.

Здоров'я людини в момент часу можна поділити на дві категорії: боляче і не боляче. Тоді, для датасету «PAV-F» будемо вважати, що всі типи болю, крім легкого – це боляче, а «не боляче» та «дискомфорт» – не боляче.

Для датасету «fer2013», щоб визначити наявність болю необхідна після обробка даних. Як правило біль виражається у інтенсивній та тривалій наявності емоції злості та суму. Інтенсивність емоції пропонуємо вимірювати коефіцієнтом ймовірності визначення емоції, який повертає нейронна мережа. Для тренування

моделей була використана Google teachablemachine.

Для навчання моделі є кілька налаштувань: епохи, одна епоха – це коли цілий набір даних передається вперед та назад через нейронну мережу лише один раз. швидкість навчання, контролює, наскільки швидко чи повільно модель нейронної мережі навчається.

Таблиця 1

Порівняння датасетів

	«fer2013»	«PAV-F»
Кількість навчальних	28 709	1200
Розмір тренувальних зображень	48×48	320×240
Колірна гамма	Чорно-білі	Кольорові
Наявність навчання моделей	Є	Є
Орієнтованість на задачу розпізнавання болю	Немає	Є
Необхідність додаткової логіки після розпізнавання	Є	Немає

Для перевірки точності роботи нейронних мережі на вхід до модуля перевірки емоційного стану на вхід подавалися зображення знайдені за пошуковим запитом «Гримаса болю» на ресурсі depositphotos. Усього 130 зображень. Для перевірки також використовувалися зображення за запитом «Емоція люди». Всі зображення цієї категорії однотипні, 150 зображень.

Кожен клас зображень був покладений у окрему директорію. Алгоритм тестування обирав директорію випадковим чином та брав зображення випадкове зображення та подав на вхід модулю розпізнавання емоцій. Коли модуль повертав результат, він порівнювався з назвою директорії, з якої було взяте зображення. Таким чином було проведено 400 тестів та отримано результати подані на табл. 2.

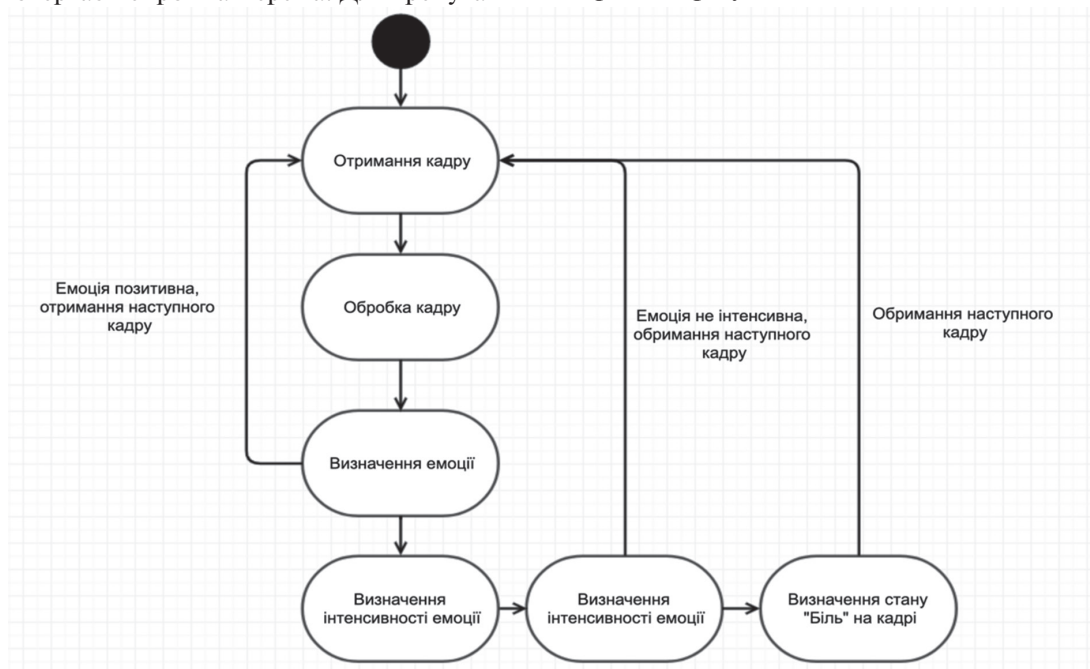


Рис 5. Діаграма станів аналізу емоції людини

**Таблиця 2**

Результати експерименту з порівняння різної кількості епох навчання.

	«fer2013»		«PAB-F»	
	50 епох	100 епох	50 епох	100 епох
Відсоток помилкових спрацювань	18%	16%	15%	13%
Відсоток не розпізнання	16%	12%	7%	3%

Тож, експериментально визначено, що спеціалізований набір даних набагато краще справляється з поставленою задачею, не дивлячись на те, що має достатньо малий набір даних. «fer2013» має високий відсоток помилкового спрацювання. Це можна пояснити тим, що на фотографіях були також явні негативні емоції, які розцінювалися як біль. При збільшенні кількості епох навчання збільшується точність та відсоток розпізнання болю, але відсоток помилкового спрацювання майже не змінився. Крім цього пропонується порівняти різні налаштування змін швидкості навчання моделі нейронної мережі. Як зрозуміло з першого експерименту, збільшення епох навчання має позитивний вплив на точність нейронної мережі. Тому, нехай у другому експерименті ми будемо використовувати 100 епох навчання нейронної мережі. Датасети для навчання – «PAB-F» та «fer2013», як і у експерименті описаному вище. Результати другого експерименту показано на табл. 3.

**Таблиця 3**

Результати експерименту з порівняння різної кількості епох навчання

	«fer2013»		«PAB-F»	
	0,0009	0,005	0,0009	0,005
Відсоток помилкового спрацювання	23%	13%	32%	10%
Відсоток не розпізнання	18%	10%	7%	2%

Отже як датасет для навчання нейронної мережі для визначення болі, рекомендується використовувати спеціалізовані датасети, необхідно вчити нейронну мережу мінімум 100 епох швидкість навчання повинна бути рівна 0,005. За можливості їх треба розширити, хоча б до 1000 зображень для кожного класу.

**Висновки**

Було порівняно два способи визначення відчуття болі: визначення відчуття болю за наявністю сильних негативних емоцій та використання для тренування нейронної мережі датасету, з зображеннями людей, поділеними на класи «боляче» - «не боляче». Експериментально визначено, що спеціалізований набір даних краще справляється з поставленою задачею, не дивлячись на те, що має достатньо малу кількість зображень. «fer2013» має високий відсоток помилкового спрацювання. Це можна пояснити тим,

що на фотографіях були також явні негативні емоції, які розцінювалися як біль. Кількість епох навчання позитивно впливає на точність нейронної мережі, а збільшення швидкості навчання – негативно. Доведено, що відчуття болю у момент часу може досить точно бути визначено за допомогою відеоспостереження.

**Література**

- [1] Bilous, N.; Povoroznyuk, A.; Kozina, O. Synthesis of structured models of computer systems in medical diagnosis, 2009 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://openarchive.nure.ua/bitstream/document/6432/1/ijitk03-3-p03.pdf>
- [2] Shcherbakova, G.; Krylov, V.; Bilous N. Methods of automated classification based on wavelet-transform for automated medical diagnostics, Information Technologies in Innovation Business Conference (ITIB) 2015, pp. 7-10. DOI: 10.1109/ITIB.2015.7355048
- [3] Hramm, O.; Bilous, N.; Ahejian, I. Configurable Cell Segmentation Solution Using Hough Circles Transform and Watershed Algorithm 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL) CAOL 2019 September 6-8, 2019, Sozopol, Bulgaria, USA: IEEE, 602-605. DOI: 10.1109/CAOL46282.2019.9019493
- [4] Dornaika, F.; Raducanu, B. Efficient facial expression recognition for human robot interaction. In Proceedings of the 9th International Work-Conference on Artificial Neural Networks on Computational and Ambient Intelligence, San Sebastián, Spain, 20–22 June 2007; pp. 700–708.
- [5] Bartneck, C.; Lyons, M.J. HCI and the face: Towards an art of the soluble. In Proceedings of the International Conference on Human-Computer Interaction: Interaction Design and Usability, Beijing, China, 22–27 July 2007; pp. 20–29
- [6] Walecki, R.; Rudovic, O.; Pavlovic, V.; Schuller, B.; Pantic, M. Deep structured learning for facial action unit intensity estimation. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Honolulu, HI, USA, 21–26 July 2017; pp. 3405–3414
- [7] Schlüter S. et al. Image processing of multiphase images obtained via X-ray microtomography: a review // Water Resources Research. – 2014. –№. 50(4). – P. 3615-3639.
- [8] Yin, L.; Wei, X.; Sun, Y.; Wang, J.; Rosato, M.J. A 3D facial Expression database for facial behavior research. In Proceedings of the International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition, Southampton, UK, 10–12 April 2006; pp. 211–216.
- [9] Jiang, B.; Valstar, M.F.; Pantic, M. Action unit detection using sparse appearance descriptors in space-time video volumes. In Proceedings of the IEEE International Conference and Workshops on Automatic Face & Gesture Recognition, Santa Barbara, CA, USA, 21–25 March 2011; pp. 314–321
- [10] Hasani, B.; Mahoor, M.H. Facial expression recognition using enhanced deep 3D convolutional neural networks. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, Hawaii, HI, USA, 21–26 July 2017; pp. 1–11.
- [11] Kunz, M., Scharmann S., Uli Hemmeter, Stefan B. The facial expression of pain in patients, California, October 2009

*Надійшла до редколегії 20.03.2020*

УДК 004.8

DOI 10.30837/bi.2020.1(94).11

**І. В. Кириченко<sup>1</sup>, Г. Ю. Терещенко<sup>2</sup>, І. В. Груздо<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> к.т.н., ст.викладач кафедри програмної інженерії,  
Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна,  
iryna.kyrychenko@nure.ua, ORCID iD: 0000-0002-7686-6439

<sup>2</sup> асистент кафедри програмної інженерії,  
Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна,  
hlib.tereshchenko@nure.ua, ORCID iD: 0000-0001-8731-2135

<sup>3</sup> к.т.н., доцент кафедри програмної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки,  
Україна, irina.guzdo@nure.ua, ORCID iD: 0000-0002-4399-2367

## ЗАСТОСУВАННЯ СИМЕТРИЧНИХ АЛГОРИТМІВ В БЛОКЧЕЙНІ

Актуальність цієї роботи зумовлена тим, що методи та технології віддалених мережевих атак регулярно вдосконалюються, а існуючі алгоритми та системи шифрування не завжди повністю захищають конфіденційну інформацію. Але розвиток технологій блокчейнів, які мають високу криптографічну стабільність, також не стоїть на місці. Ці обставини роблять розробку та впровадження безпечної системи передачі даних із використанням криптографічних підписів із відкритим та приватним ключами дуже актуальними.

БЛОКЧЕЙН, СИМЕТРИЧНІ АЛГОРИТМИ, BLOWFISH, DES

Актуальность данной работы обусловлена тем, что методы и технологии удаленных сетевых атак регулярно совершенствуются, а существующие алгоритмы и системы шифрования не всегда полностью защищают конфиденциальную информацию. Но и развитие технологий блокчейн, обладающих высокой криптографической стабильностью, также не стоит на месте. Эти обстоятельства делают разработку и внедрение системы безопасной передачи данных с использованием криптографических подписей с открытыми и закрытыми ключами очень актуальными.

БЛОКЧЕЙН, СИМЕТРИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ, BLOWFISH, DES

The relevance of this work is due to the fact that the methods and technologies of remote network attacks are regularly improved, and existing encryption algorithms and systems do not always fully protect confidential information. But the development of blockchain technologies, which have high cryptographic stability, also do not stand still. These circumstances make the development and implementation of a secure data transmission system using cryptographic signatures with public and private keys very relevant.

BLOCKCHAIN, SYMMETRIC ALGORITHMS, BLOWFISH, DES

### Вступ

Технологія зберігання інформації блокчейн стала досить актуальна в останні роки. Неможливо заперечувати її значимість в суспільстві, в якому збільшується потреба у підтвердженні правдивості і охорони збереженої інформації. Численні фахівці переконані в тому, що ця технологія здатна застосовуватися в багатьох галузях. Технології, засновані на застосуванні блокчейна можуть зробити переворот в концепції урядового управління, економічних послуг та індустрії. Надаються величезні можливості, проте основне питання полягає в їх реалізації.

Блокчейн – це розподілена база даних, в якій можна зберігати будь-які дані або транзакції. У блокчейні зберігається інформація усєї мережі, що складається з персональних комп'ютерів, і в результаті виходить не тільки децентралізований, а й розподілений простір. Отже, ні компанія, ні людина, ні будь-яка інша довірена сторона не є власником цієї мережі. Всі люди можуть користуватися системою і тим самим підтримувати її функціонування, тому одній людині дуже складно зламати або повністю знищити мережу. Користувачі мережі використовують

свої персональні комп'ютери для зберігання пучків даних інших користувачів, які називаються блоками («blocks») в хронологічному ланцюзі («chain»), звідси і назва «блокчейн» дослівно «ланцюг з блоків».

Смарт-контракти – головний рушій технології блокчейн, адже тільки з системою, як блокчейн, в якій не можна підробити, змінити та видалити дані, смарт контракти можуть прирівнюватися до офіційних документів. Наразі, у блокчейні використовується лише один алгоритм шифрування у смарт контрактах, бо вважається, що для його взлому необхідно більше декількох сот років на сучасному етапі. Але, ніхто не змушує нас використовувати лише один алгоритм, що як використовувати різні алгоритми, або суміш алгоритмів шифрування, які зможуть дати навіть більшу криптостійкість та швидкість виконання алгоритму [1].

Криптостійкі алгоритми, прийняті в якості національних або світових стандартів, є загальнодоступними. Їх криптостійкість базується на нерозв'язних за прийнятний час математичних задачах. Але реалізація криптоалгоритмів з урахуванням високої швидкодії, відсутності помилок і гарантованого виконання

вимог математичних перетворень – непросте завдання, яким займаються кваліфіковані розробники.

В разі, якщо електронний підпис використовується в критичних додатках (наприклад, для виконання юридично значимих дій), реалізація криптоалгоритмів в обов’язковому порядку проходить процес сертифікації на відповідність вимогам безпеки. Додатково, засоби криптографічного захисту інформації (ЗКЗІ) можуть мати саме різне уявлення: від програмних бібліотек до високопродуктивних спеціалізованих залозок (Hardware Security Module, HSM).

Саме через складність реалізації і регулювання даного виду продукції існує ринок рішень з криптографічного захисту інформації, на якому грають різні гравці. З метою сумісності різних реалізацій, а також спрощення їх вбудовування в прикладне програмне забезпечення, були розроблені кілька стандартів, які стосуються різних аспектів роботи з ЗКЗІ і безпосередньо електронним підписом [2].

## 2. Експеримент

Кожна система безпеки повинна забезпечувати пакет функцій безпеки, які можуть забезпечити секретність системи. Ці функції зазвичай називають цілями системи безпеки. Ці цілі можна перерахувати за наступними п’ятьма основними категоріями:

- аутентифікація: це означає, що перед надсиланням та отриманням даних за допомогою системи слід підтвердити особу одержувача та відправника;

- секретність або конфіденційність: зазвичай ця функція (функція) – це те, як більшість людей ідентифікують захищену систему, що означає, що лише аутентифіковані люди здатні інтерпретувати зміст повідомлення (дати) і ніхто інший;

- цілісність: цілісність означає, що зміст повідомлених даних гарантується таким, що не містить будь-якого типу змін між кінцевими точками (відправник і одержувач), основна форма цілісності - це контрольна сума пакетів у пакетах IPv4;

- не передача: ця функція передбачає, що ні відправник, ні одержувач не можуть помилково заперечувати те, що вони надіслали певне повідомлення;

- надійність та доступність сервісу: оскільки захищені системи зазвичай піддаються нападку зловмисників, це може вплинути на їх доступність та тип послуг для користувачів, такі системи повинні забезпечувати спосіб надання своїм користувачам якості послуг, які вони очікують [3].

Таблиця 1 містить показники швидкості для деяких найпоширеніших криптографічних алгоритмів. Усі були закодовані в C#, складені з Microsoft Visual Studio (оптимізація всієї програми, оптимізація для швидкості, генерування коду P4) та працювали на процесорі Intel Core I5 2.1 ГГц під Windows 10, підпрограми використовувались для багатопоточного

додавання та віднімання. Властивості SSE2 використовувались для багатопоточного множення.

З таблиці 1 можна помітити, що не всі режими були випробувані для всіх алгоритмів. Тим не менш, ці результати добре мають вказувати про те, як повинні виглядати представлені результати порівняння.

Таблиця 1

Результати порівняння

Algorithm	MB/Seconds	Time spent (milliseconds)	Processed megabytes (2 ^ 20 bytes)
Blowfish	64,386	3,976	256
AES (128-bit key)	61,010	4,196	256
AES (192-bit key)	53,145	4,817	256
AES (256-bit key)	48,229	5,308	256
AES (128) CTR	57,710	4,436	256
AES (128) OFB	52,925	4,837	256
AES (128) CFB	47,601	5,378	256
AES (128) CBC	55,447	4,617	256
DES	21,340	5,998	128
(3DES)DES-XEX3	20,783	6,159	128
(3DES)DES-EDE3	9,848	6,499	64

Також показано, що Blowfish та AES мають найкращі показники серед інших. І обидва, як відомо, мають краще шифрування (тобто сильніші проти атак даних), ніж інші два [4].

На рисунках 1 і 2 наведені результати експериментів, які проводилися на двох різних машинах: I-5 2,66 МГц і I-5 2,4 ГГц.

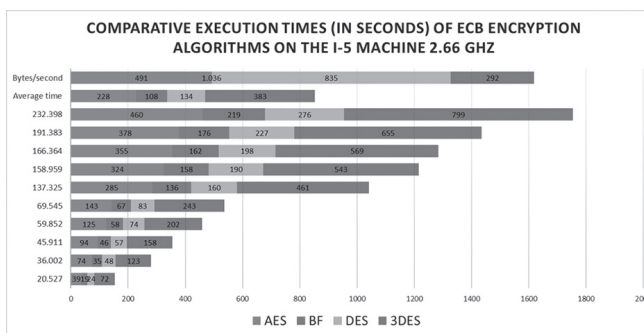


Рис. 1. Порівняльні часи виконання (у секундах) алгоритмів шифрування в режимі ECB на машині I-5 2,66 МГц

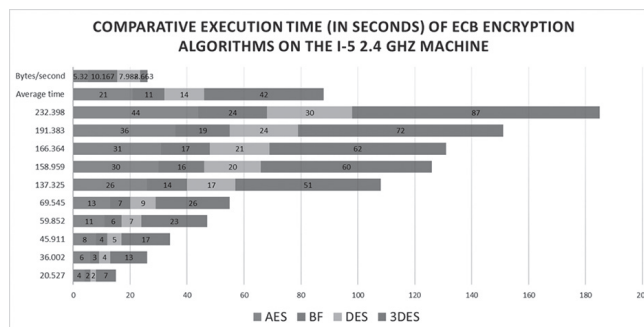


Рис. 2. Порівняльний час виконання (в секундах) алгоритмів шифрування в режимі ECB на машині I-5 2,4 ГГц

З результатів легко помітити, що Blowfish має перевагу перед іншими алгоритмами з точки зору пропускної здатності. Результати показали, що Blowfish має дуже хороші показники порівняно з іншими алгоритмами. Також було показано, що AES має кращі показники, ніж 3DES та DES. Дивовижно це також показує, що 3DES має майже 1/3 пропускної здатності DES, або іншими словами, для обробки однакового обсягу даних йому потрібно 3 рази більше часу, ніж DES.

Були проведені експерименти для порівняння продуктивності різних алгоритмів шифрування, реалізованих всередині .NET Core. Їх результати близькі до показаних на рисунках 3 та 4.

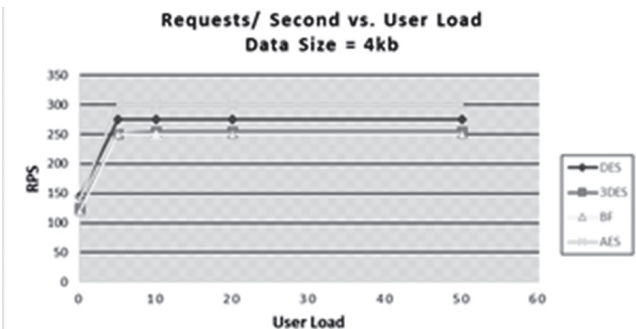


Рис. 3. Результати порівняння

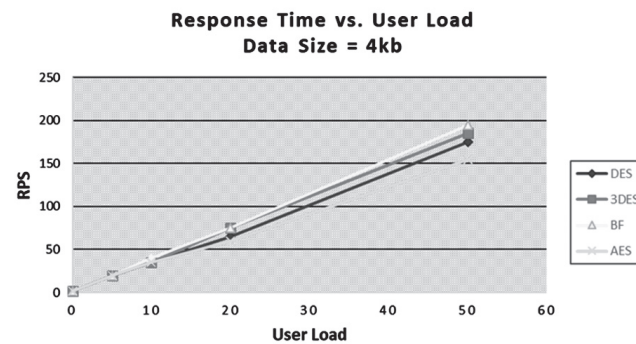


Рис. 4. Результати порівняння

У реалізації реалізовані керовані обгортки для DES, 3DES та Rijndael, доступні в System.Security.Cryptography, які охоплюють некеровані реалізації, доступні в CryptoAPI. Це DESCryptoServiceProvider, TripleDESCryptoServiceProvider і RijndaelManaged відповідно. У System.Security.Cryptography, яка була використана в тестах, є лише чиста керована реалізація Rijndael[5].

У таблиці 2 показані параметри алгоритмів, що використовуються в цьому експерименті.

Таблиця 2

Налаштування алгоритмів

Algorithm	Block size (Bit)	Key size (Bit)
DES	64	64
3DES	64	192
Rijndael	128	259
Blowfish	64	448

3DES та AES підтримують інші налаштування, але ці параметри представляють максимальні параметри

безпеки, які вони можуть запропонувати. Більша довжина ключів означає, що потрібно докласти більше зусиль, щоб порушити захист зашифрованих даних.

Оскільки тест оцінювання призначений для оцінки результатів при використанні блок-шифру, через обмеження пам'яті на тестовій машині (1 Гб) тест розбиває блоки даних про завантаження на менші розміри. Дані навантаження поділяються на блоки даних і вони створюються за допомогою класу RandomNumberGenerator, доступного в просторі імен System.Security.Cryptography.

Експерименти проводяться з використанням Intel core i-5 64-бітового процесора з 8 ГБ ОЗУ. Програма моделювання складається за допомогою стандартних налаштувань у .NET 2019 Visual Studio для програм C# Windows. Експерименти були проведені кілька разів, щоб переконатися в тому, що результати є послідовними та справедливими для порівняння різних алгоритмів.

Для оцінки продуктивності порівняних алгоритмів необхідно визначити параметри, для яких алгоритми повинні бути протестовані.

Оскільки особливості безпеки кожного алгоритму як його сили проти криптографічних атак вже відомі та обговорюються. Вибраним фактором для визначення продуктивності є швидкість алгоритму для шифрування/дешифрування блоків даних різного розміру [6].

Розглядаючи різні розміри блоків даних (від 0,5 МБ до 20 МБ), алгоритми оцінювались з точки зору часу, необхідного для шифрування та дешифрування блоку даних. Усі реалізації були точними, щоб переконатися, що результати будуть відносно справедливими та точними.

Програма приймає три входи: алгоритм, режим шифрування та розмір блоку даних. Після успішного виконання відображаються дані, що генеруються, шифруються та розшифровуються. Зауважте, що більшість персонажів не можуть з'явитися, оскільки вони не мають представлення символів. Ще одне порівняння проводиться після успішного процесу шифрування/дешифрування, щоб переконатися, що всі дані обробляються правильним шляхом, порівнюючи згенеровані дані (оригінальні блоки даних) та дешифрований блок даних, що генерується в процесі.

Перший набір експериментів проводили в режимі ECB, результати показані на рисунку 5 Результати показують перевагу алгоритму Blowfish над іншими алгоритмами з точки зору часу обробки. Це також показує, що AES споживає більше ресурсів, коли розмір блоку даних порівняно великий. Результати, показані тут, відрізняються від результатів, отриманих раніше, оскільки розміри блоків даних значно більше, ніж ті, що використовуються в експерименті [7].

Тут також можна помітити, що 3DES вимагає завжди більше часу, ніж DES через свою

характеристику трифазного шифрування. Blowfish, хоча він має довгий ключ (448 біт), перевершує інші алгоритми шифрування. DES і 3DES, як відомо, мають черв'якові отвори у своєму захисному механізмі, Blowfish та AES, з іншого боку, поки що не мають.

Ці результати не мають нічого спільного з іншими навантаженнями на комп'ютер, оскільки кожен окремий експеримент проводився кілька разів, в результаті чого був досягнутий майже однаковий очікуваний результат. Впровадження DES, 3DES та AES в .NET вважається найкращим.

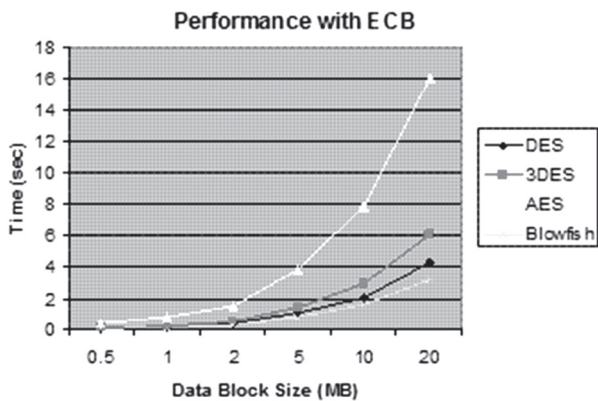


Рис. 5. Результати роботи в режимі ECB

Як очікується, CBC вимагає більше часу на обробку, ніж ECB, через його ключовий характер. Результати, показані на рисунку 6 також вказують на те, що додатковий час, що додається, не є важливим для багатьох застосувань, знаючи, що CBC значно кращий, ніж ECB з точки зору захисту. Різницю між двома режимами важко помітити неозброєним оком, результати показали, що середня різниця між ECB та CBC становить 0,059896 секунди, що порівняно невелика [8].

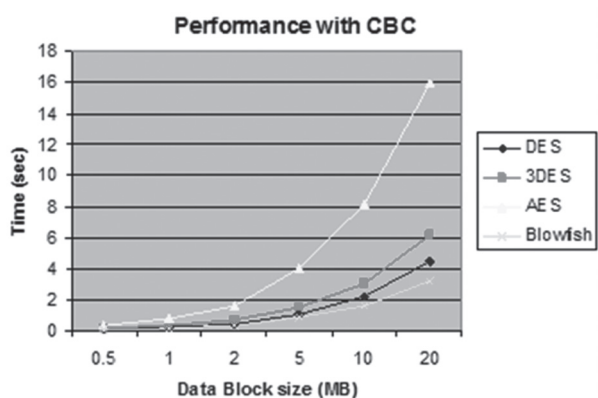


Рис. 6. Результати роботи в режимі CBC

AES показав низькі результати роботи порівняно з іншими алгоритмами, оскільки він вимагає більшої потужності для обробки. Використання режиму CBC дало додаткового часу на обробку, але в цілому це було відносно незначним, особливо для певного застосування, яке вимагає більш безпечного шифрування до відносно великих блоків даних.

На підставі усіх вищезгаданих даних, було складено таблицю 3 з усіма алгоритмами, які можуть використовуватися з технологією блокчейн та надано коротку характеристику кожного з них [9].

Представлені результати моделювання показали, що Blowfish має кращу продуктивність, ніж інші поширені алгоритми шифрування, що використовуються. Оскільки Blowfish досі не має жодних відомих слабких місць безпеки, що робить його відмінним кандидатом, щоб його розглядали як стандартний алгоритм шифрування[10].

## Висновки

Нинішній час вимогливо ставиться до технічних рішень, особливо до питання приватності та анонімності даних, в тому числі коли справа стосується фінансової діяльності. Блокчейн технологія і справді є революційною та дає можливість не модифікувати старе ставлення, а подивитися на питання взаємовідносин користувачів та сторонніх інстанцій абсолютно під іншим кутом.

Раніше завдання полягало в тому, як знайти для власної системи найбільш надійних постачальників ресурсів, регуляторів та верифікаторів, тепер – яку форму блокчейн технології використовувати, адже його спільнота ефективно заміщає всі вище перелічені ролі в системі.

Для цього не потрібно будувати модель з довершеною технологією, бо під час реалізації на практиці все одно прийдеться чимось поступатися на перевагу пріоритетним характеристикам. Саме тому обирається синтез адаптивних підходів, що передбачає:

- відокремлення бізнес-стратегій та сфер, де блокчейн не може бути використана чи застосована тільки частково з огляду на певні ліміти технології;
- узагальнене та ретельне оформлення вимог користувачів вищезгаданих систем;
- будову нових моделей блокчейну, які в тих чи інших умовах зможуть забезпечувати максимум вимог користувачів.

Незважаючи на вже реалізовані алгоритми збереження приватності, є щонайменше чотири різних аналізи, які розроблені для виявлення конференційної інформації в середовищі цієї криптосистеми. Цей аналіз було успішно здійснено внаслідок прозорості даних у блокчейні, а також питанню ліквідності та ідентифікації поведінки користувачів. Проте потрібно зробити так, щоб система водночас ефективно працювала і при цьому задовольняла широке коло вимог користувачів.

Нові підходи, що орієнтовані не тільки на збереження конфіденційності клієнтів, а й на поліпшення технології блокчейн взагалі, а саме: підвищення децентралізації мережі, швидкодню транзакцій, можливість мікро-операцій тощо. Важливо пам'ятати, що поняття приватності не статична та фіксована річ. Це

Таблиця 3

Порівняння криптографічних алгоритмів

Алгоритм	Ким створений	Рік	Розмір ключа	Розмір блоку	Раунд	Структура	Складність	Функції
DES	IBM	1975	64 бітів	64 бітів	16	Фейстель	Ні	Не достатньо сильний
DH	Вітфілд Діфф і Мартін Гелман	1976	Змінна	—	—	Фейстель	—	Хороша безпека та швидкість
E-DES	IBM	1977	1024 бітів	128 бітів	16	Фейстель	—	Хороша безпека та швидкість
RSA	Рівест Шамір Адлеман	1977	1024 - 4096	128 бітів	1	Алгоритм відкритого ключа	Ні	Відмінна безпека та низька швидкість
T-DES	IBM	1978	112 або 168	64 бітів	48	Фейстель	Так	Відмінна безпека та швидкість
ECC	Ніл Кобліц та Віктор Міллер	1985	Більше, ніж симетричні та змінні	Змінна	1	Алгоритм відкритого ключа	Так	Відмінна безпека та швидкість
EEE	Тахер Ельгамал	1985	1024 бітів	—	—	Алгоритм відкритого ключа	Так	Досить забезпечений і швидкісний
RC4	Рон Рівест	1987	Змінна	40-2048	256	Фейстель потік	Так	швидкий шифр
RC2	Рон Рівест	1987	8, 128, 64 за замовчуванням	64 бітів	16	Фейстель	—	Гарна та швидка безпека
BLOWFISH	Брюс Шнайер	1993	32-448	64 бітів	16	Фейстель	Так	Швидкий шифр в SSL
SEAL	Філіп Рогавей та Дон Коппер-Сміт	1994	160 бітів	32 бітів	2	Алгоритм відкритого ключа	Так	Не сильна безпека і швидка швидкість
DSA	NIST	1997	Змінна	—	—	Алгоритм відкритого ключа	Так	Хороша безпека та швидкість
RC6	Рон Рівест та ін	1998	128 біт до 256 біт	128 бітів	20	Фейстель	Так	Хороша безпека
AES	Джоан Дейман та Інсент Ріджмен	1998	128,192,256 бітів	128 бітів	10, 12, 14	Перестановка заміни	Так	Безпека відмінна. Це найкраще в забезпеченні безпеки та шифрування

ціль, за яку постійно ведеться боротьба між криптографами та зловмисниками. Абсолютної приватності не існує. Тому наша задача – адаптуватися до технологічного середовища, яке змінюється, та пропонувати нові алгоритми й підходи, що будуть забезпечувати надійність та ефективність роботи системи.

**Список літератури:**

[1] Асиметрична схема. URL: <https://helpiks.org/4-30251.html> (дата звернення: 06.03.2020).

[2] Використання хеш-функцій. URL: <https://helpiks.org/4-30249.html> (дата звернення: 15.03.2020).

[3] Про електронний цифровий підпис. // База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/852-15> (дата звернення: 15.03.2020).

[4] Ефект від впровадження wms. URL: [https://stud.com.ua/172359/logistika/efekt\\_vprovadzhennya](https://stud.com.ua/172359/logistika/efekt_vprovadzhennya) (дата звернення: 10.03.2020).

[5] *Єлізаров А. Б.* Аналіз алгоритмів електронно-цифрового підпису під час передачі інформації. URL: [http://www.rusnauka.com/22\\_AND\\_2016/Informatica/4\\_215303.doc.htm](http://www.rusnauka.com/22_AND_2016/Informatica/4_215303.doc.htm) (дата звернення: 03.03.2020).

[6] *Кесавулу Р.* Аналіз продуктивності криптографічних алгоритмів в інформаційній безпеці. URL: <https://www.ijert.org/performance-analysis-of-cryptographic-algorithms-in-the-information-security> (дата звернення: 01.04.2020).

[7] *Клімушин П. С.* Механізми забезпечення довіри в національній системі електронних цифрових підписів. URL: <http://www.kbuara.kharkov.ua/e-book/tpdu/2013-2/doc/1/08.pdf> (дата звернення: 05.04.2020).

[8] Комп'ютерна криптографія. URL: [http://dspace.tneu.edu.ua/retrieve/49411/%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86%D1%96%D1%97\\_%D0%9A%D0%9A.pdf](http://dspace.tneu.edu.ua/retrieve/49411/%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86%D1%96%D1%97_%D0%9A%D0%9A.pdf) (дата звернення: 05.04.2020).

[9] Криптоаналіз блочних та поточкових шифрів. URL: <https://infopedia.su/8xb3f.html> (дата звернення: 15.04.2020).

[10] *Ланіна М. А.* Правове регулювання відносин у сфері електронного документообігу. URL: <http://yport.inf.ua/pravovoe-regulirovanie-otnosheniy-sfere.html> (дата звернення: 15.04.2020).

*Надійшла до редколегії 03.04.2020*



О.І. Повзун<sup>1</sup>, Н.Б. Козел<sup>2</sup>, Г.Г. Четвериков<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Кандидат технічних наук, доцент, Донецький національний технічний університет,  
povzun.aleksey@gmail.com

<sup>2</sup>Старший викладач кафедри ПІ ХНУРЕ, м. Харків, Україна,  
ORCID iD: 0000-0001-9276-9877, natalia.kozel1@nure.ua

<sup>3</sup>Доктор технічних наук, професор, ХНУРЕ, м. Харків, Україна,  
ORCID iD: 0000-0001-9276-9877, chetvergg@gmail.com

## КОНЦЕПЦІЇ ОРГАНІЗАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНО-ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПІДТРИМКИ СУСПІЛЬНО-ЕКОНОМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ. ЧАСТИНА 1

The article is devoted to the analysis of the problem of creating artificial intelligence systems that allow modeling at the logical and hardware levels of economic solutions described by mathematical operations on natural language, and which are elements of  $k$ -valued structural organization of information and intellectual technologies. It describes the concept of organizing information and intellectual technologies, as well as intellectual support of socio-economic processes, in particular, financial and credit enterprises. In the article, the intellectual activity of people is investigated in its external (problem solving, understanding and interpretation of natural language, visual information, etc.) and internal (accumulation, transfer and use of knowledge) forms.

KNOWLEDGE BASE, LOGIC, NATURAL LANGUAGE, ARTIFICIAL INTELLIGENCE,  $k$ -VALUED STRUCTURE

Стаття присвячена аналізу проблеми створення систем штучного інтелекту, які дозволяють моделювати на логічному та апаратному рівнях економічні рішення, описані математичними операціями над природною мовою, і які є елементами  $k$ -значної структурної організації інформаційно-інтелектуальних технологій. Вона описує концепцію організації інформаційно-інтелектуальних технологій, а також інтелектуальної підтримки суспільно-економічних процесів, зокрема фінансово-кредитних підприємств. У статті досліджується і моделюється інтелектуальна діяльність людей в її зовнішньому (розв'язання задач, розуміння та інтерпретація природної мови, візуальної інформації і т.д.) і внутрішньому (накопичення, передача і використання знань) проявах.

БАЗА ЗНАНЬ, ЛОГІКА, ПРИРОДНА МОВА, ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ,  $k$ -ЗНАЧНА СТРУКТУРА

Статья посвящена анализу проблемы создания систем искусственного интеллекта, которые позволяют моделировать на логическом и аппаратном уровнях экономические решения, описанные математическими операциями над естественным языком, и которые являются элементами  $k$ -значной структурной организации информационно-интеллектуальных технологий. Она описывает концепцию организации информационно-интеллектуальных технологий, а также интеллектуальной поддержки общественно-экономических процессов, в частности финансово-кредитных предприятий. В статье исследуется и моделируется интеллектуальная деятельность людей в ее внешнем (решение задач, понимание и интерпретация естественного языка, визуальной информации и т.д.) и внутреннем (накопление, передача и использование знаний) проявлениях.

БАЗА ЗНАНИЙ, ЛОГИКА, ЕСТЕСТВЕННЫЙ ЯЗЫК, ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ,  $k$ -ЗНАЧНАЯ СТРУКТУРА

### Вступ

У ХХІ столітті виникла матеріально-енергетична та соціально-економічна криза суспільного виробництва, виходом із якої став перехід економічно розвинутих країн від матеріально-енергетичних технологій виробництва та споживання до інформаційно-інтелектуальних технологій, де економія матеріально-енергетичних ресурсів досягається шляхом переходу від опрацювання інформації до обробки знань. Інтелектуальна підтримка суспільно-економічних процесів дозволяє раціонально розв'язати триєдине завдання прогресу сучасної цивілізації – підвищення ефективності, гуманістичності та екологічності виробництва [1-7].

Найшвидші суперкомп'ютери сьогодні працюють набагато повільніше, ніж це потрібно для роботи з

даними і знаннями, поданими мовними моделями, що описують описові науки. Розв'язання цієї проблеми залежить від того, чи будуть створені відповідні комп'ютерні системи, здатні працювати зі швидкістю у 1000 разів більшою, ніж існуючі найбільші суперкомп'ютери [1-7]. Поняття „нові інформаційні технології” передбачає вміння користуватися сучасними засобами та методами добування, опрацювання і систематизації знань.

### 1. Мета роботи

Основним завданням цієї роботи є виклад новостворюваної концепції організації інформаційно-інтелектуальних технологій та інтелектуальної підтримки суспільно-економічних процесів, зокрема діяльності фінансово-кредитних установ. Предметом

досліджень є моделювання інтелектуальної діяльності людей як у зовнішньому її прояві (вирішення складних завдань, розуміння природної мови, інтерпретація візуальної інформації та мови), так і у внутрішньому (накопичення, надання і використання знань).

## 2. Основні поняття та визначення

У теорії пізнання постулюються для новостворюваних теорій два основоположних принципи: «якщо існує об'єкт, то його можна досліджувати» та «щоб уникнути труднощів взаєморозуміння, необхідно перш за все порозумітись із основними визначеннями», які стосуються даної теорії. Відповідно, *наочною чи проблемною галуззю* ми називатимемо сукупність даних і знань, що є достатнім для інформаційного (заданого на контекстно-залежній мові) забезпечення рішення деякої задачі чи сукупності завдань інтелектуальної системи.

Складність поняття *знань*, завжди виражається на деякій мові відношень, полягає у множинності можливостей її реалізації і нерозривності з поняттям *дані*, в безперервному процесі їх зміни, врахування якого забезпечує реалізацію контекстного зв'язку даних.

Відзначимо сферу предметних галузей, де найдоцільніше працювати з даними і знаннями, поданими мовними моделями. Це галузі з переважанням емпіричного знань, де складність фактів і їх описів виключає використання мови математики — так звані описові науки, які, загалом, і стали такими, бо вивчають те, що не може бути адекватно описане мовою математики — відкриті системи в їх природному оточенні, системи, спостережувані на рівні апарату лінгвістики. Як буде видно з подальшого, саме такий підхід дозволяє добиватися найбільшого ступеня адекватності опису тієї чи іншої системи, особливо при введенні поняття зміни формально-логічних властивостей лінгвістичного апарату під дією вхідних інформаційних потоків.

Сказане вище означає, що сукупність знання—дані в завданнях управління подається деякою семіотичною системою. Взагалі кажучи, під семіотикою розуміється наука про знаки і знакові системи, а також про мови як знакові системи, причому загальний підхід до мовних знакових систем, що включає не тільки традиційне поняття мови, але і мови запахів, свисту, абстрактного живопису і тому подібне, вимагає ще свого теоретичного обґрунтування. Мовою може бути все, що забезпечує виникнення і існування комунікативної функції для своїх користувачів.

У семіотичній системі зазвичай виділяють три аспекти: *синтаксичний, семантичний і прагматичний*. Такого роду розділення цікавить нас із наступної причини. Відповідно до перерахованих трьох аспектів семіотичних систем необхідно виділити *три типи знань, як три типи відношень між даними*: синтаксичні, семантичні і прагматичні.

*Знання синтаксичного типу* характеризує синтаксичну структуру потоку інформації, яка не залежить від сенсу і змісту використовуваних при цьому понять, тобто інтелектуальну систему не утворює.

*Семантичне знання* розглядається як структура, утворююча поточний контекст. Воно містить інформацію, безпосередньо пов'язану з поточними значеннями і сенсом описуваних понять і зумовлює стан зв'язків даних в інформаційній базі.

*Прагматичне знання* зумовлює найбільш вірогідні зв'язки, що описують дані з погляду вирішуваної задачі (узагальнений чи “об'єктивний” контекст), наприклад, із урахуванням специфічних критеріїв і угод, що діють у даному завданні.

Поняття об'єктивності відповідає трактуванню прагматики, прагматичного аспекту створення інтелектуальної системи як спрямованого обмеження її “свободи волі”, обмеження непотрібних зв'язків і “фантазії зв'язків за контекстом” для системи, від якої ми не чекаємо надлишку інтелектуальності. Для порівняння пригадаємо, що ми маємо на увазі, коли даємо людині характеристику “прагматик”.

З інженерної точки зору, синтаксична, семантична і прагматична сторони знань є різними зв'язками одного чи групи термінів (даних) з іншими записами в інформаційній базі.

Зі сказаного зрозуміло, що найбільш загальна проблема побудови системи управління семантичного чи семантико-прагматичного рівня взаємодії пов'язана з вибором технології контекстно-залежного подання знань, побудовою інформаційних баз (даних і знань) про предметну галузь і механізму висновку для отримання необхідних рішень.

Логіка цього механізму може мінятися залежно від контекстів взаємозв'язків знаків (їх прагматики), що є однією з найважливіших причин початкової організації всіх практичних робіт тільки на проблемно-орієнтованій підмножині контекстно-залежної мови, тобто там, де ми сподіваємося на деяку постійність контексту. Ця умова є корисною тільки в сенсі забезпечення деякої початкової простоти побудов. Але, на відміну від “чистих формально-логічних систем”, умова постійності контексту не є для нас обов'язковою. Всі наші побудови орієнтовані, кінець кінцем, саме на мінливості поточного контексту, без чого ми не маємо права говорити про інтелектуальні системи.

Структурування мови йде через формування базового набору відношень (їх число не більше 200): часових, просторових, казуальних, квантифікуючих (бінарні, тернарні), тощо. Метапроцедури — це цілеспрямований пошук у лабіринті можливостей, побудова чи пошук нових лабіринтів, структурування, декомпозиція задач на підзадачі, формування закономірностей на підставі спостережень. У основі наших знань про світ лежать системи класифікації, які дозволяють нам сприймати світ як структурований за мірою загальності об'єкт.

### 3. Оброблення мов декларативного типу

Мови декларативного типу зручні для опису (подання) знань у системах ШІ [7]. Оброблення мови декларативного типу можна розбити на дві частини:

- те, що декларує людина;
- те, що опрацьовує ЕОМ.

Попереднє оброблення людиною полягає в абстрагуванні реальної проблеми у фізичну чи математичну модель. У подальшому математична модель перетворюється у машинно-орієнтоване відображення, яке сприймає ЕОМ. Складання відповідної програми для перетворення форм подання інформації можливе лише з допомогою семантичного опрацювання. ЕОМ при цьому здійснює лише підтримку оброблення, що його здійснює людина.

Основу такої машинної мови складають:

- основні поняття;
- семантика (на основі відповідного синтаксису);
- процедурні зображення, що описують семантичні одиниці;
- відповідні правила структурування понять (синтаксичні правила).

Механізми оброблення (їх робота) визначаються семантикою та синтаксисом мови [1-3]. Мови процедурного типу є мовами опису, що базуються на семантиці процедур. Операційні механізми цих мов відповідають функціям оброблення та перетворення інформації, а структурні елементи мови не мають нічого спільного з об'єктами реального світу. Процедурна семантика розглянута й описана в теорії обчислень, що дозволяє отримати повноцінний теоретичний опис системи оброблення знань у ШІ.

Мова декларативного типу опирається на відповідну їй структуру даних. Причому структура даних відповідає концептуальній структурі світу. Структура даних мови декларативного типу включає в себе компоненти, які визначаються структурою пам'яті ЕОМ. У мовах декларативного типу співвідношення синтаксис-семантика аналогічні співвідношенню природна мова — рисунки, графи, просторові зображення, бази даних, тощо.

Бази даних — це абстрактні моделі обмеженої прикладної галузі (галузі знань), які поділяються на:

- a) інженерні БД;
- b) ієрархічні;
- c) мережеві;
- d) реляційні;
- e) постреляційні.

Подання моделей декларативних мов здійснюється предикатами, малюнками, кресленнями, графами, тощо. Математична структура даних у декларативних мовах базується на системах предикатних рівнянь в алгебрі скінченних предикатів (АСП) або на аксіоматичній теорії множин, у якій теорія множин інтерпретується як структура даних.

Таким чином, приходимо до можливо єдиного шляху, яким найповніше, найоб'єктивніше і

найефективніше треба і можна йти шляхом створення систем ШІ — це шлях аналізу, моделювання та синтезу мовного інтелектуального інтерфейсу із допомогою АСП, засобів  $k$ -значної логічної системи та відповідних структур і кодування.

АСП [7] є узагальненням алгебри логіки і визначена як:

$$x^\delta = \begin{cases} x, \delta = 1, \\ \bar{x}, \delta = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де  $\delta$  — степінь аргументу.

Генеральною ідеєю АСП є розширення області пробігання  $\delta$  до  $\{a_0, a_1, \dots, a_{k-1}\}$ , де  $a_0, a_1, \dots, a_{k-1}$  —  $k$ -значні змінні. Виходячи з цього, задаються функції розпізнавання символів  $a_i$  змінної  $x$ :

$$x^{a_i} = \begin{cases} 1, x = a_i, \\ 0, x \neq a_i. \end{cases} \quad (2)$$

При цьому фіксується множина змінних  $x_1 \dots x_n$  та скінчених областей пробігання  $A_j = \{a_{i_1}, \dots, a_{i_{k_j}}\}$  кожної змінної  $x_j$ , які можуть бути довільної значності.

Функції розпізнавання з'єднуються операціями  $\&$ ,  $\vee$  булівської алгебри, у результаті чого отримуються вирази  $x^a$  &  $(y^b \vee x^c)$ , названі в [1] скінченними предикатами. Вони трактуються як функції виду:

$$f: A_1 \times \dots \times A_n \times \{0, 1\}. \quad (3)$$

Це, по суті, характеристичні функції  $k$ -значної логіки, але, на відміну від неї, в АСП усі функції можуть приймати значення лише з множини  $E_2 = \{0, 1\}$ . Операції (1) розпізнавання,  $\&$  та  $\vee$  утворюють функціонально повний базис у множині функцій виду (3).

Теорія інтелекту — це наука про детерміновані, дискретні і скінченні функції індивідуального людського інтелекту [7]. Таке визначення істотно обмежує поле діяльності для дослідника інтелекту.

По-перше, це визначення вимагає, щоб теорія інтелекту обмежилася вивченням лише функціональної сторони інтелекту, залишаючи осторонь структуру його матеріального носія. При цьому за межами теорії інтелекту залишаються такі цікаві і важливі питання, як будова мозку і нервової системи людини, функціонування їх окремих частин і структур.

По-друге, теорія інтелекту визначається як теорія індивідуального людського інтелекту. Отже, з теорії інтелекту виключаються процеси взаємодії людей один із одним, а це веде до винесення соціальних явищ за її межі. Крім того, таким визначенням виключаються з розгляду інші, ще не відкриті наукою, можливі види інтелекту, а також взаємодія між інтелектом різних видів.

По-третє, прийняте тут визначення теорії інтелекту вимагає виключення з розгляду безперервних і нескінченних інформаційних процесів, веде до зменшення ролі чинника випадковості у діяльності інтелекту. Недолік такого підходу приводить, зокрема, до неможливості усестороннього вивчення

на його основі системи «інтелект — зовнішній світ». Ігнорування статистичної природи сигналів, що надходять до інтелекту із зовнішнього світу, також істотно збіднює теорію інтелекту. Бажання обійтися без безперервних моделей сильно затрудняє вивчення роботи органів чуття, органів руху і мови людини.

Таким чином, прийняте нами визначення теорії інтелекту страждає багатьма недоліками, воно обмежує предмет цієї науки порівняно вузькими рамками, при цьому багато процесів і механізми, які люди схильні інтуїтивно відносити до розряду інтелектуальних, залишаються за межами цього визначення. Нижче приводяться міркування, що спонукали нас, не дивлячись на наголошені моменти, зупинитися на так недосконалому визначенні теорії інтелекту.

Перш за все, слід взяти до уваги ту обставину, що, навіть якщо б ми врахували всі ті доповнення, які тільки що були згадані, все одно повнота визначення теорії інтелекту не була б досягнута. Інтелект — це така система, яка знаходиться в постійному розвитку; ніхто не в змозі передбачати всі можливі напрями і наслідки цього розвитку. Не виключено також, що з часом будуть відкриті нові види інтелекту, принципово відмінні від людського. Тому визначення теорії інтелекту, як би ми не старалися, у будь-якому випадку буде неповним. З іншого боку, в майбутньому у зв'язку з успіхами пізнання інтелекту ніщо не перешкодить його дослідникам розширити рамки теорії інтелекту, коли в цьому з'явиться необхідність. В даний момент, проте, така необхідність гостро не відчувається. Навіть те, порівняно вузьке, визначення теорії інтелекту, яке прийняте нами, ставить масу цікавих задач. Рішення цих задач і практичне використання досягнень теорії інтелекту обіцяє великі блага людству. В даний час, поки теорія інтелекту знаходиться ще у стадії зародження і робить перші кроки у своєму розвитку, вельми розширювальне тлумачення її предмету надало б їй «ведмедючу послугу», бо потурало б розпилюванню наукових сил і засобів, розтраті зусиль у безплідних спробах вирішувати задачі, складність яких перевершує можливості сучасної науки. І, навпаки, вдале тимчасове обмеження предмету теорії інтелекту дозволило б сконцентрувати зусилля на першочергових задачах теорії інтелекту, послужило б стимулом до якнайшвидшого її розвитку.

Визначаючи теорію інтелекту таким чином, як це зроблено в роботах [1-7], ми виходили з того погляду, що детермінованим, дискретним і скінченним процесам в інтелектуальній діяльності належить провідна роль. Вельми важливою обставиною, що вплинула на вибір такого визначення, послужила також наявність на даний час універсальних цифрових обчислювальних машин. Детерміновані, дискретні і скінченні процеси — це в точності ті процеси, які в принципі можуть бути реалізовані на цифрових обчислювальних машинах. Це надає у розпорядження теорії інтелекту універсальний засіб для практичної перевірки і

апробації всіх її висновків і рекомендацій. При прийнятому визначенні теорія інтелекту стає могутньою рушійною силою у справі подальшого вдосконалення засобів обчислювальної техніки. Це вдосконалення, у свою чергу, спричинить серйозну стимулюючу дію на розвиток самої теорії інтелекту.

Обмеження теорії інтелекту детермінованими, дискретними і скінченними процесами дає можливість забезпечити її універсальним математичним апаратом для формального опису довільних скінченних відношень. У роботі як такий апарат запропоновано алгебру скінченних предикатів. На наш погляд, АСП може служити міцним фундаментом теорії інтелекту. Саме завдяки наявності цієї алгебри ми зважилися виділити теорію інтелекту в розряд самостійної наукової дисципліни.

Створення АСП доводить до логічного кінця пошуки універсальної математичної мови для опису детермінованих, дискретних і скінченних інформаційних процесів. АСП у відомому значенні є узагальненням апарату булевих функцій (перехід від двійкових знаків до букв) і апарату багатозначної логіки (перехід від функцій до відношень). Використання АСП у теорії інтелекту приводить до виключення потенційної нескінченності з формальних описів інтелектуальних процесів, що забезпечує краще наближення одержуваних моделей до дійсності, ніж те, яке може дати апарат теорії алгоритмів. АСП вводить у вжиток скінченні алфавітні оператори, адекватніші для формального опису детермінованих, дискретних і скінченних інформаційних процесів, ніж ті, що широко використовуються в даний час для тієї ж мети потенційно нескінченні алфавітні оператори.

Важливо підкреслити, що АСП не є чимось зовнішнім стосовно теорії інтелекту. Вона є не тільки засобом формального опису функцій інтелекту, але в її формулах укладена сама суть інтелектуальних процесів. Формули АСП природним чином інтерпретуються як поняття інтелекту, її рівняння — як думки, думки інтелекту, а процес рішення рівнянь — АСП — як процес мислення.

Наявність АСП відкриває можливість переходу від алгоритмічного опису інформаційних процесів до опису їх у вигляді рівнянь. Ми вважаємо, що мова рівнянь добре відповідає специфіці інтелектуальних процесів. На відміну від алгоритмів і програм для ЕОМ, рівнянням АСП, як, втім, і будь-яким іншим рівнянням, не властива спрямованість дії. Алгоритмічний процес завжди реалізує деяку функцію, з його допомогою проводиться визначення значень цієї функції залежно від значень її аргументів. Рівняннями ж можна задати відносини між змінними. Всі змінні в рівнянні рівноправні, будь-які з них, залежно від нашого бажання, можуть виступати як у ролі незалежних, так і у ролі залежних змінних. Алгоритми і програми описують функціонування систем з входами і виходами, а рівняння АСП описують

функціонування багатополюсних систем. У першому випадку вхід і вихід системи жорстко зафіксовані, у другому випадку вхідні сигнали можуть подаватися на будь-які полюси, а знімання вихідних сигналів також може проводитися з будь-яких полюсів.

Особлива перевага способу опису об'єкту за допомогою рівнянь у порівнянні з алгоритмічним описом полягає у тому, що за рівняннями можна визначити реакції об'єкту при будь-якому способі розподілу вхідних і вихідних сигналів між його полюсами. Якщо число змінних у рівняннях велике (а в рівняннях, що описують інтелектуальні процеси, це число, поза сумнівом, буде дуже великим), то таким же великим буде і число полюсів у об'єкта, описуваного цими рівняннями. Число ж усіх різних способів розподілу вхідних і вихідних сигналів між полюсами об'єкту буде астрономічно великим. У цих умовах практично неможливо створити повний набір алгоритмів, кожний з яких обчислював би реакції об'єкту при якомусь одному способі розподілу вхідних і вихідних сигналів між полюсами об'єкту.

Рівняння вигідно відрізняються від алгоритмів ще й тим, що дозволяють розраховувати (хоча і неточно) реакції описуваного ними об'єкту навіть при неповному його завданні. Не повністю ж розроблений алгоритм буде просто непрацездатним. Опис об'єкта у вигляді системи рівнянь можна легко удосконалювати, проводячи в ньому лише локальні зміни шляхом додавання або виключення окремих рівнянь. Навіть у процесі своєї реконструкції система рівнянь завжди залишається готовою до використання. Описуючи ж реакції об'єкту за допомогою алгоритму, ми ризикуємо зіткнутися з необхідністю корінної переробки алгоритму при щонайменших змінах наших знань про об'єкт. Опис об'єктів за допомогою рівнянь — традиційний спосіб наукового опису світу. Цей спосіб широко поширений у фізиці, хімії, техніці і багатьох інших науках. Нам представляється, що прийшов час використовувати його також і при описі дискретних інформаційних процесів.

Алгоритми і програми для ЕОМ, з одного боку, і рівняння АСП — з іншого, що розглядаються як засоби математичного опису скінченних об'єктів, відрізняються ще в одному вельми важливому відношенні. Алгоритми і програми, описуючи деякий об'єкт, разом із тим містять у собі ще й рецепт обчислення реакцій цього об'єкту на зовнішні дії. Укладач алгоритму чи програми вимушений вирішувати відразу дві задачі: 1) природничонаукову задачу математичного опису об'єкту; 2) формально-логічну задачу визначення реакцій об'єкту на зовнішні дії. Рівняння ж, описуючи об'єкт, не містять у собі рецепту обчислення реакцій цього об'єкту. Щоби ці рівняння привести в дію, їх необхідно розв'язати за допомогою спеціально розробленого методу. При математичному описі об'єкту за допомогою рівнянь їх укладач вирішує не обидві задачі, а тільки одну з них — першу. Він не

робить нічого зайвого, не захаращує опис інформацією, що не відноситься до справи, тому природно чекати, що математичний опис об'єктів за допомогою рівнянь буде простішим, ніж опис тих же об'єктів за допомогою алгоритмів і програм. Ми сподіваємося, що рівняння АСП стануть основним інструментом у справі моделювання інтелектуальних процесів.

Вважаємо, що мова рівнянь добре відповідає специфіці інтелектуальних процесів. На відміну від алгоритмів і програм для цифрових ЕОМ рівняння АСП, як, втім, і будь-яким іншим рівнянням, не властива спрямованість дії. Алгоритмічний процес завжди реалізує деяку функцію, з його допомогою проводиться визначення значень цієї функції в залежності відношень тощо); поняття алгебри логіки і багатозначної логіки; деякі поняття, пов'язані з процесами обробки виразів (слово, довжина слова, з'єднання слів, упаковка виразу, об'єднання виразів, тощо); прості лінгвістичні поняття (голосні, шиплячі, елементи парадигматичної таблиці тощо). У цій галузі ще належить виконати величезний обсяг робіт. Їх завершення означатиме формалізацію всієї системи понять, якою володіє людський інтелект. У міру розширення круга понять, математично описаних засобами АСП, її мова ставатиме все більш ємною і абстрактною, поступово наближаючись по своїй силі і виразності до природної мови.

Важливою проблемою теорії інтелекту є розробка методів і засобів для вирішення рівнянь АСП. Вони необхідні для фізичного відтворення інформаційних процесів, формально описаних теорією інтелекту. Без вказаних методів і засобів математичні моделі функцій інтелекту залишаться тільки мертвими записами на папері. На даний час зроблено перші кроки у напрямі рішення цієї проблеми: побудовано алгоритми рішення рівнянь АСП шляхом приведення їх до досконалої диз'юнктивної нормальної форми і шляхом послідовної підстановки в рівняння знайдених значень змінних; розроблені методи мінімізації формул і методи декомпозиції рівнянь АСП; знайдено способи явного виразу невідомих для рівнянь із постійними і змінними параметрами; описано ряд тотожностей, на основі яких можуть виконуватися спрощення формул за наявності в них символів вищого рівня абстракції, що скорочують (заперечення, імплікація, об'єднання множин, з'єднання слів, упаковка виразів, тощо).

Рішення рівнянь, що описують складні інтелектуальні процеси, можна подати як багатоярусний процес, здійснюваний на різних рівнях абстракції. Щоб повністю автоматизувати процес, необхідно заздалегідь виконати дуже велику роботу щодо формального опису властивостей понять різного рівня абстракції, створити теорію тотожних перетворень і спрощення формул різних консервативних розширень АСП. Як перший крок у цій галузі розроблено початки теорії виразів, в якій формально описані прості перетворення послідовностей символів (селекція, комутація,

зсув, перестановка, вибірка, розмноження, знищення, заміна букв виразу, підрахунок букв виразу, віднімання виразів, тощо).

Нагальною задачею теорії інтелекту є створення універсального вирішувача задач, який на першому етапі робіт можна подати у вигляді спеціальної програми для цифрових ЕОМ, розв'язку певного класу рівнянь АСП з символікою достатньо високого рівня абстракції. Рішення цієї задачі дозволило б взагалі відмовитися від складання програм для багатьох задач, складність яких не перевершує деякий заданий рівень. Достатньо б було записати умови задачі у вигляді системи рівнянь АСП і вирішити систему за допомогою універсального вирішувача.

Другий етап робіт у цьому напрямі представляється як створення спеціалізованої машини для вирішення рівнянь АСП заданого рівня складності. Така машина, по суті, виявилася б відправним пунктом у справі створення системи штучного інтелекту. У міру того, як у процесі вдосконалення машини, збільшувалася б гранична складність вирішуваних нею рівнянь, а також росли б рівень абстрактності і число освоєних нею понять, спостерігався б поступовий розвиток її інтелекту. Зараз зроблені певні зусилля у напрямі створення передумов до побудови такої машини. Розроблено початки теорії ланцюгів перемикачів і теорії цілком скінчених автоматів, розглянуто способи схемної реалізації деяких первинних математичних структур і операцій (множин і відношень, операцій над ними, булевих і перемикачів функцій, арифметичних дій, операцій над виразами і словами, тощо).

#### 4. Фонетичний аналіз. моделі буквофонемних відношень для голосних та приголосних звуків української мови

Задача фонетичного аналізу полягає у тому, щоби засобами АСП описати букво-фонемне відношення, що зв'яже звук мови у визначеному фонетичному контексті з відповідною йому буквою українського алфавіту.

Перш ніж перейти до математичного опису фонетичного відношення, уведемо формальне визначення фонем як знаку. Це визначення фонем для української мови можна записати у вигляді наступного індивідуального предиката [1]:

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{он}}(X) = & x^a \vee x^b \vee x^c \vee x^d \vee x^e \vee x^f \vee \\ & x^g \vee x^h \vee x^i \vee x^j \vee x^k \vee x^l \vee \\ & x^m \vee x^n \vee x^o \vee x^p \vee x^q \vee x^r \vee x^s \vee \\ & x^t \vee x^u \vee x^v \vee x^w \vee x^x \vee x^y \vee x^z. \end{aligned} \quad (5)$$

Твердження, що  $X$  є фонема, еквівалентне рівності  $\Phi_{\text{он}}(X) = 1$ .

У [7] побудовано математичні моделі букво-фонемних відношень для голосних та приголосних звуків української мови на підставі методики формального опису букво-фонемних правил рівняннями алгебри скінчених предикатів (АСП).

Для створення математичних моделей букво-фонемних відношень уведено 12 граматичних ознак фонем:  $y_1$  — ознака голосності звуку із значеннями  $g$  — голосна,  $p$  — приголосна;  $y_2$  — ознака шумності приголосних із значеннями  $sh$  — шумова,  $n$  — не шумова;  $y_3$  — ознака вокалізації звуку із значеннями  $dz$  — дзвінка,  $g$  — глуха;  $y_4$  — ознака проривності звуку із значеннями  $pr$  — проривна,  $sh$  — щільна;  $y_5, y_6$  — ознаки веляризації та лабілізації звуку із значеннями  $m, c, v$  — мала, середня, велика відповідно;  $y_7$  — ознака палаталізації із значеннями  $t, m$  — тверда, м'яка відповідно;  $y_8$  — ознака назалізації із значеннями  $r$  — ротова,  $n$  — носова;  $y_9$  — вібрантизності із значеннями  $s$  — спокійна,  $t$  — тремтяча;  $y_{10}$  — місця артикуляції звуку  $g$  — губна,  $p$  — передньоязикова,  $z$  — задньоязикова;  $y_{11}$  — ознака передньоязикової шумової фонемі із значеннями  $z$  — зубна,  $p$  — піднебінна;  $y_{12}$  — ознака африкативності передньоязикових шумових фонем із значеннями  $a$  — африката,  $n$  — не африката.

Під час переходу від фонетичних ознак до фонетичного зображення звуку формується фонема — знак, що позначає клас звуків, які тяжіють до певної букви тексту. Зворотне перетворення забезпечує заміну фонетичного знака набором відповідних йому значень фонетичних ознак звуку. Процедури таких перетворень детально розроблено і описано в [1] і тут не наводяться, щоби за дрібними деталями не втратити картину загального підходу.

Моделювання букво-фонемних відношень голосних і приголосних української мови здійснюється за допомогою рівнянь АСП, що зв'язують між собою звук  $Y$  мови, який перебуває у певному фонетичному контексті  $Z$ , та його графічне зображення  $X$ :

$$F(X, Y, Z) = 1, \quad (6)$$

де  $X$  — алфавіт української мови;  $Y$  — звуки української мови;  $Z$  — фонетичний контекст.

У рівняннях типу (6) звук мови подається у вигляді вектора  $Y = (p, q, t)$  із компонентами  $p, q, t$ , що виконують роль фонетичних ознак, суть яких описана нижче. Як формальний еквівалент впливу фонетичного контексту в [1] розглядається сукупність ознак  $(p_w, q_w, p_v, q_v)$ . Відповідно еквівалентом впливу наголосу є змінна  $t$ . Набір змінних  $(X_1, \dots, X_{32})$  характеризує графічне зображення звуку.

Традиційний опис фонетики української мови використовує поняття фонетичного пом'якшення [1]. Будь-якому звуку мови властиве одне з двох можливих значень цієї ознаки:  $t$  — тверда,  $m$  — м'яка. У букво-фонемній моделі даний елемент характеристики подається змінною  $q$ . Наступна логічна рівність формально визначає область зміни для уведеної змінної:

$$q^T \vee q^M = 1. \quad (7)$$

Під час опису букво-фонемного відношення наступним є поняття наголошення. Воно визначає інформацію про наявність чи відсутність наголосу

голосного звуку, що розглядається. Для формалізації граматичної категорії наголошування скористаємось змінною  $t$  із області визначення, що складається з трьох можливих значень даної категорії:

$$t_3 \vee t_2 \vee t_1 = 1, \quad (8)$$

де 3 — біжучий голосний звук, який перебуває у наголошеному складі, 2 — у переднаголошеному складі, 1 — у решті складів слова.

Уведемо сукупність змінних  $Q_z$ , необхідних для формального опису понять, зв'язаних із визначенням фонетичного контексту. До таких понять відноситься опис фонетичних позицій абсолютного початку та абсолютного кінця слова, середини слова, сусідства з м'якими чи твердими голосними й приголосними; опис передвокальної, поствокальної та інтервокальної позицій, положення після чи до групи приголосних, різних за місцем та способом утворення, за участю голосу тощо. Множину змінних  $Q_z$  назвемо характеристикою фонетичного контексту.

Для того, щоби виразити залежність між звуком  $Y$  та характеристикою фонетичного контексту  $Z$  у вигляді логічних рівнянь, знадобляться змінні, що описують оточення звуку в слові, що досліджується. Позначимо змінною  $u$  звук слова, що безпосередньо йде за досліджуванним звуком  $y$ . Якщо звук  $Y$  перебуває в положенні абсолютного кінця слова, приймаємо  $u = -$ . Областю визначення змінної  $u$  будемо вважати множину всіх звуків української мови. Позначимо предикат, що стоїть у лівій частині рівняння (3) через  $J_1(p)$ , тоді область зміни змінної  $u$  може бути задана рівнянням

$$J_1(p_u) = 1. \quad (9)$$

Предикат  $J_1(p_u)$  відповідає поняттю «звук української мови». Звук, що передує біжучому звукові слова, експлікуємо за допомогою літерної змінної  $v$ . Якщо  $Y$  звучить на початку слова, то приймаємо  $v = L$ .

На підставі вивчення даних фонетики і орфографії української мови в [1] розроблено систему фонетичних ознак, а також систему предикатів для формального опису системи фонетичних ознак, що дозволяє здійснювати їх автоматичне оброблення. Розроблено методику формального опису букво-фонемних відношень, побудовано математичні відношення голосних та приголосних звуків української мови, на основі яких формалізуються закономірності поєднання голосних і приголосних букв та звуків, що утворюють пари за дзвінкістю-глухістю й твердістю-м'якістю, а також поза парних приголосних. Розроблено математичну модель акцентних характеристик української мови. Усі ці результати дозволяють отримати компакту модель для економного запису словників природної мови в пам'яті ЕОМ.

Із допомогою опису букво-фонемних зв'язків у вигляді системи рівнянь АСП можна в інтелектуальному інтерфейсі здійснити формальний перехід

від фонетичного запису слова до його графічного зображення (задача фонетичного аналізу), за даним орфографічним текстом отримати його фонетичну транскрипцію (задача синтезу мови), а також перейти до системного та структурного синтезу процесорів функціонально-зорієнтованих на аналіз та синтез мови, які є необхідною складовою частиною систем штучного інтелекту.

## 5. Морфологічний аналіз

*Морфологічний аналіз* — це оброблення словоформ без зв'язку з контекстом. Словоформа — це відтинок тексту між двома просвітками. Розділові знаки вважаються окремими словоформами.

У центрі уваги морфології стоїть слово з його граматичними змінами. У лінгвістичній літературі термін «морфологія» вживається для позначення відповідної системи всередині мови, у яку входить словозміна (словотворення розглядається як самостійна система) [1].

Під словозміною розуміється утворення форм одного й того ж слова, що існує в мові, як система форм (словоформ). Словоформи «можна визначити, як регулярні видозміни слова, об'єднані тотожністю його лексичного значення й неоднаковими морфологічними значеннями» [1]. Запропоноване визначення охоплює такі зміни, за яких зберігається цілим лексичне значення слова.

Нижче об'єктом формального опису є письмова, тобто орфографічна, а не фонематична реалізація словоформ української мови. Така форма запису усуває необхідність додаткового оброблення під час введення/виведення текстів, а також дозволяє усунути із опису акцентний компонент. При цьому окремою словоформою є відтинок тексту між двома проміжками.

Утворення слова звичайно відбувається за допомогою спеціальних словозмінних морфем. Під морфемою будемо розуміти мінімальну значущу одиницю мови: «Морфема — це найменша неподільна значуща частина слова, тобто одиниця мови, а в мові виступають окремі представники морфем, які зручно називати морфами» [1].

За значеннями і функцією в структурі слова морфемі поділяються на кореневі і службові. Морф — конкретний вияв морфемі, найменша значуща частина, що виділяється у складі певної конкретної словоформи слова. Особливу роль під час словозміни відіграють закінчення словоформ (флексії), що передають, як правило, граматичні значення в українських словах. Закінчення завжди виступає в певній системі словозміни змінюваних частин мови.

Типи відмінювання іменників, прикметників, числівників, займенників розрізняються системою закінчень, які виражають граматичні значення відмінка, роду і числа або лише відмінка (в кількісних числівниках). Наприклад у іменників флексії

завершують матеріальну побудову, закріплюють лексико-граматичне значення слів, сприяють відображенню таких категорійних ознак як рід, одухотвореність, число, відмінок. Дієслова мають складну систему дієвідмінювання за особами, родами і числами, основними показниками яких є особово-, родово-числові флексії.

Будемо класифікувати флексії на регулярні та нерегулярні. Регулярні флексії — найрозповсюдженіші й приймаються за норму. Описана нижче математична модель базується на формальній моделі морфології української мови.

У морфології української мови існує певна залежність (відношення) між флексією та оточуючим її текстом. Завдання полягає у математичному описі існуючої залежності, тобто у формалізації поняття флексії. Текст, що охоплює закінчення, є неоднорідним щодо нього. Будемо розрізняти найближчий текст (що межує безпосередньо із закінченням у словоформі) і подальший текст (що межує з словоформою, у якій перебуває закінчення, що нас цікавить).

У роботі [1] введено поняття текстового відношення  $T(X, Y)$ , де  $X$  — набір граматичних ознак, що виділяє підмножину усіх текстів із деякої множини різноманітних рядків обмеженої довжини, упорядкованих із букв скінченного алфавіту;  $Y$  — текст. Текст розглядається як багаторівнева структура, у якій із букв утворюються морфи, а з морфів — словоформи, із словоформ — речення, та з речень — абзаци. Окремі частини цієї конструкції названі фрагментами тексту (букви, морфи, словоформи, речення, тощо). У математичній моделі системи української словозміни, як фрагмент тексту виступають словозмінні морфеми, що можуть бути суфіксами й закінченнями. Враховуючи висловлене раніше зауваження щодо ролі флексій у процесах словозміни, зосередимо подальший розгляд на методиці формального опису процесів зміни слів (за допомогою флексій), що можна застосувати й до інших лінгвістичних одиниць тексту.

Дію тексту, що оточує закінчення (як ближчого, так і подальшого), замінимо введенням деякого набору ознак, який проінтерпретуємо як *смысл закінчення* [1]. Під *смыслом* будемо розуміти набір проміжних змінних, що зв'язують рівняння, які описують закінчення, з рівняннями, що описують решту частини тексту. Набір значень цих змінних будемо інтерпретувати як значення *смыслу*. *Смысл* розглядається як змінний вектор  $X = (X_1, X_2, \dots, X_m)$ , де  $m$  — число компонентів вектора *смыслу*, а змінні  $X_1, X_2, \dots, X_m$  — компоненти *смыслу*.

Нехай  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$  — закінчення, де значенням  $Y_i$  служить  $i$ -а за рахунком буква закінчення. Набір  $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$  буквених змінних  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$  назовемо *змінним закінченням*, набір значень цих змінних — *індивідуальним закінченням* чи просто закінченням. Змінні змінного закінчення, їх значення назовемо значеннями компонентів закінчення.

Під час побудови математичної моделі флексії описується *фрагментне морфологічне* відношення  $L(X, Y)$ , що відтворює зв'язок між *смыслом*  $X$  і змінним фрагментом (флексійним морфом) тексту  $Y$ . Параметрами введеного відношення можуть бути будь-які із компонентів вектора *смыслу*. При цьому  $X \in H, Y \in M$ , де  $H$  — множина наборів значень компонентів *смыслу*,  $M$  — множина різних послідовностей скінченної довжини, упорядкованих із букв українського алфавіту та символу проміжка ( $L$ —), що служить для заповнення вільних від букв позицій у закінченнях.

Вважаємо, що морфологічне відношення  $L(X, Y)$  виконується тоді і тільки тоді, коли  $Y$  передає значення компонентів *смыслу*  $X$ . Мовна практика говорить про те, що результат перевірки умови виконання морфологічного відношення має бути однозначним (у протилежному випадку людина не змогла б ефективно формувати тексти).

Згідно з викладеним вище принципом однозначності, закінчення завжди однозначно залежить від *смыслу*. Цей принцип можна інтерпретувати як вимогу повноти набору ознак (компонентів *смыслу*), із допомогою якого здійснюється вибір індивідуального закінчення. Набір ознак будемо називати повним, якщо він при будь-яких значеннях ознак забезпечує однозначність вибору відповідної йому флексії. У якості *смыслу* приймемо будь-який набір ознак, що задовольняє вимозі повноти. Під повним *смыслом* флексії будемо розуміти набір, складений з деяких компонентів вектора *смыслу*  $X$ . *Смысл* флексії, у прийнятому раніше значенні, будемо називати *повним смыслом*. Поняття повного й неповного *смыслу* флексії введено за аналогією з відповідними поняттями для фрагменту тексту. Моделювання фрагментного відношення необхідно почати з вибору структури багатоконтактних векторів  $X$  та  $Y$ . Як компоненти вектора  $Y$  необхідно вибрати букви закінчення. При цьому нумерація букв ведеться в межах флексії зліва направо. Що ж стосується вибору структури вектора *смыслу*  $X$ , то тут значно все складніше.

Для того, щоб отримати компактний та повний опис фрагментного морфологічного відношення  $L(X, Y)$ , необхідно вибрати компоненти вектора  $X$  із урахуванням внутрішньої структури мови. Для раціонального вирішення цього завдання будемо спиратися на поняття, сформульовані морфологією української мови. Критерієм під час оцінки припустимості вжитку того чи іншого поняття, виробленого мовознавством, має бути, очевидно, успіх формалізації природної мови. Через те, що об'єкт, який моделюється, є достатньо складною для математичного опису системою, зручно розбити його на ряд підсистем (які будемо надалі називати «мовними блоками»), що пізніше об'єднуються теоремою про розкладання в алгебрі скінченних предикатів [2].

Для кожного мовного блоку фіксують значення деяких із компонентів смислу, які ми назвемо обмеженими. Наприклад одним із таких компонентів смислу може бути ознака частини мови, що дозволяє формалізувати флексійне оброблення кожної частини мови окремо. Другу групу ознак, що служать безпосередньо для вибору закінчення усередині деякого мовного блоку, назвемо змінними. Необхідно відзначити, що назви двох груп ознак умовні, оскільки насправді всі компоненти вектора смислу є змінними. Обмежувальним ознакам поставимо у відповідність змінну  $\xi$ , а змінним —  $X$ . Таким чином, маємо можливість уточнити структуру вектора смислу  $X = (\xi, X) = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k, X_1, X_2, \dots, X_l)$ , де  $k, l$  — число обмежувальних та змінних компонентів вектора смислу відповідно.

Змінні ознаки в свою чергу неоднорідні щодо закінчення. Раніше вже підкреслювалася неоднорідність тексту, що оточує флексію. Впливові ближнього тексту на закінчення будуть відповідати лексичні ознаки, а подальшого — синтаксичні.

Щоби визначити склад змінних ознак математичної моделі, необхідно сформулювати таку вимогу до неї: закінчення  $Y$ , яке перебуває в морфологічному відношенні зі смислом  $X$ , має однозначно визначатися смислом (у відповідності з принципом однозначності). Унаслідок цього, до складу змінних компонентів вектора смислу включенні як словозмінні категорії (для прикметників — рід, число, відмінок), так і несловозмінні, але такі, що керують утворенням різних варіантів форм. Наприклад наявність у деяких слів сучасних та архаїчних варіантів форм: уста, перст — *архаїчне*, губи, палець — *сучасне*. Тому до складу змінних ознак включено ознаку зі значеннями: сучасне (с), архаїчне (а). Не завжди закономірності в утворенні варіантів форм настільки очевидні, що їм можна поставити у відповідність будь-яку морфологічну категорію. У подібних випадках будемо вводити так звані умовні морфологічні категорії, що відповідають простому перерахуванню варіантів форм.

Отже, завдання полягає у формальному описі засобами АСП фрагментного морфологічного відношення  $L = (\xi, X) = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k, X_1, X_2, \dots, X_l, Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$ , що буде моделлю флексійного оброблення українських словоформ. Морфологічне відношення визначається своєю характеристичною функцією  $L_\varphi(X, Y)$ , що задається наступним чином:

$$L_\varphi(X, Y) = \begin{cases} 1, \text{ якщо } X \text{ і } Y \text{ зв'язані} \\ \text{морфологічним відношенням;} \\ 0, \text{ у протилежному випадку.} \end{cases} \quad (10)$$

Відношення (6) є предикатом, визначеним на скінченній множині предметної галузі. Він дозволяє інтерпретувати різноманіття граматичного оброблення українських флексій (аналіз, синтез, нормалізація, корегування помилок, тощо) із допомогою розв'язків канонічних рівнянь виду  $L_\varphi(X, Y) = 1$ .

Подамо морфологічну функцію у явному вигляді:

$$y_j^\sigma = F_\sigma(\xi, X), 1 \leq j \leq n. \quad (11)$$

Вона буде описана, якщо нам вдасться подати у вигляді формул предикати  $F_\sigma$ , де  $\sigma$  належить множині значень, які приймають букви закінчень. Предикати  $F_\sigma(\xi, X)$  задаються різноманітними ідентифікаторами (розпізнавачами)  $y_j^\sigma$  для змінної  $y_j$ .

Тут прийнято паралельний метод опису множини флексійних морфів [1], згідно із яким утворюється множина місць для усіх флексій, що підлягають опису. Кожному місцю  $j$  ставиться у відповідність своя змінна  $y_j$ . Як формальний еквівалент флексії приймаємо набір значень усіх змінних  $y_j$ . Значенням змінної  $y_j$  є стан місця  $j$  для індивідуального морфа.

Таким чином, задача опису множини флексійних морфів зводиться до формального опису функції виду:

$$y_j^\sigma = F_\sigma(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k, X_1, X_2, \dots, X_l), 1 \leq j \leq n.$$

### Висновки

На підставі вивчення даних фонетики і орфографії української мови та за допомогою опису буквофонемних зв'язків у вигляді системи рівнянь АСП можна:

- в інтелектуальному інтерфейсі здійснити формальний перехід від фонетичного запису слова до його графічного зображення (задача фонетичного аналізу);
- за даним орфографічним текстом отримати його фонетичну транскрипцію (задача синтезу мови);
- перейти до системного та структурного синтезу процесорів, функціонально-зорієнтованих на аналіз та синтез мови, які є необхідною складовою частиною систем штучного інтелекту.

### Список літератури:

- [1] Бондаренко М.Ф., Коноплянко З.Д., Четвериков Г.Г. Основи теорії синтезу надшвидкодійних структур мовних систем штучного інтелекту. — К.: ІЗМН, 1997. — 264 с.
- [2] Бондаренко М.Ф., Коноплянко З.Д., Четвериков Г.Г. Основи теорії багатозначних структур і кодування в системах штучного інтелекту. — Х.: Фактор-Друк, 2003. — 336 с.
- [3] Коноплянко З.Д., Четвериков Г.Г. Проблеми інтелектуалізації та українізації цифрових систем та мереж телекомунікацій // Труды УНИИРТ. — 1995. — № 4. — С. 72–81.
- [4] Коноплянко З.Д., Четвериков Г.Г. Аналіз лінгвістичних зв'язків елементів фонетичного рівня української мови // Праці УНДІРТ. — 1996. — № 1(5). — С. 70–77.
- [5] Четвериков Г.Г., Ляховець С.В., Коноплянко З.Д., Колесник А.С. Аналіз та дослідження букво-фонемних відношень української мови // Праці УНДІРТ. — 2001. — № 1(25). — С. 79–83.
- [6] Лачинов В.М., Поляков А.О. Информодинамика или Путь к Миру открытых систем. — Санкт-Петербург: Издательство СПбГТУ. — 1999. — 432 с.
- [7] Шабанов-Кушнарченко Ю.П. Теория интеллекта. Проблемы и перспективы. — Харьков: Вища шк., 1987. — 160 с.

Надійшла до редколегії 28.04.2020 р.



Н.С. Кравець<sup>1</sup>, А.В. Ховрат<sup>2</sup>, Н.С. Сайчишина<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Кандидат технічних наук, доцент кафедри Програмної інженерії,  
Харківський національний університет радіоелектроніки,  
natalia.kravets@nure.ua, ORCID iD: 0000-0002-6753-3333

<sup>2</sup>Студент кафедри Програмної інженерії,  
Харківський національний університет радіоелектроніки, artem.khovrat@nure.ua

<sup>3</sup>Студент кафедри Програмної інженерії,  
Харківський національний університет радіоелектроніки, nataliia.saichyshyna@nure.ua

## АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕНЗОРНИХ ПРОЦЕСОРІВ В ЗАДАЧАХ МАШИННОГО НАВЧАННЯ НА ПРИКЛАДІ GOOGLE TPU

Проведено детальний аналіз тензорного процесору від компанії Google, розглянуто його математичне підґрунтя, структурні складові та ключові стадії роботи для використання при розв'язанні задач пов'язаних з машинним навчанням. Розглянуто методи прискорення процесу тренування нейронної мережі без втрати якості, реалізовані в TPU: квантування, паралельна обробка, систолічний масив, механізм інкапсуляції обчислень в нейронних мережах. Здійснений розбір обмежень та переваг цього виду процесору загалом та у порівнянні з графічним та центральним процесорами. Розглянуто конкурентні переваги даного тензорного процесору з аналогами, що пропонуються іншими компаніями. Описана взаємодія із хмарною платформою Google та з програмною бібліотекою TensorFlow.

АРХИТЕКТУРА ПРОЦЕСОРА, МАШИННЕ НАВЧАННЯ, ТЕНЗОР, ТЕНЗОРНИЙ ПРОЦЕСОР, ХМАРНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЦЕНТРАЛЬНИЙ ПРОЦЕСОР, ГРАФІЧНИЙ ПРОЦЕСОР, ПАРАЛЕЛЬНІ ОБЧИСЛЕННЯ

Проведен детальний анализ тензорного процессора от компании Google, рассмотрен его математический базис, структурные составляющие и ключевые стадии работы для использования при решении задач, связанных с машинным обучением. Рассмотрены методы ускорения процесса тренировки нейронной сети без потери качества, реализованные в TPU: квантование, параллельная обработка, систолический массив, механизм инкапсуляции вычислений в нейронных сетях. Проведен разбор ограничений и преимуществ этого вида процессору в целом и в сравнении с графическим и центральным процессорами. Рассмотрены конкурентные преимущества данного тензорного процессора с аналогами, предлагаемыми другими компаниями. Описано взаимодействие с облачной платформой Google и с программной библиотекой TensorFlow.

АРХИТЕКТУРА ПРОЦЕССОРА, МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ, ТЕНЗОР, ТЕНЗОРНЫЙ ПРОЦЕССОР, ОБЛАЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ПРОЦЕССОР, ГРАФИЧЕСКИЙ ПРОЦЕССОР, ПАРАЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

A detailed analysis of the tensor processor by Google was carried out, its mathematical basis, structural components, and key work stages for use in solving problems related to machine learning were considered. Methods for speeding up the neural network training process without loss of quality implemented in TPU are considered: quantization, parallel processing, systolic array, and the mechanism for encapsulating calculations in neural networks. The analysis of the limitations and advantages of this type of the processor as a whole and in comparison, with the graphics and central processors. The competitive advantages of this tensor processor with analogues offered by other companies are considered. The interaction with the Google cloud platform and with the TensorFlow software library is described.

ARCHITECTURE OF THE PROCESSOR, MACHINE LEARNING, TENSOR, TENSOR PROCESSOR, CLOUD TECHNOLOGIES, CENTRAL PROCESSOR, GRAPHICS PROCESSOR, PARALLEL COMPUTATION

### Вступ

Різновид машинного навчання, відомий як глибоке навчання, використовується Google для обробки пошукових запитів на природній мові та розпізнавання зображень. Реалізація моделей глибокого навчання збільшує точність розпізнавання об'єктів, але потребує обробки дуже великих наборів даних зі складною структурою, що у свою чергу вимагає нових алгоритмів та паралельного обчислювального обладнання. Дослідники з Google випустили свою власну платформу глибокого навчання TensorFlow в якості програмного забезпечення з відкритим кодом.

У 2017 році компанія Google анонсувала TPU (Tensor Processing Unit) [13, 14], тензорний процесор,

— кастомний пристрій, що є спрямованою інтегрованою мікросхемою, створеною спеціально для машинного навчання. Рік тому TPU були розміщені на хмарній платформі GoogleCloud та зроблені публічними для не комерційного використання. Як і подібні мікросхеми від NVIDIA чи Intel, наприклад CPU[1], центральний процесор, та GPU[2], графічний процесор, цей засіб обробки тензорів застосовується для збільшення швидкості виконання високонавантажених операцій у машинному навчанні, зокрема для апаратного прискорення глибоких нейронних мереж.

Окрім цього TPU спроектований спеціально для використання із фреймворком машинного навчання

від Google TensorFlow[3], що збільшує його ефективність. У цій статті здійснений розгляд, запропонованої технології як загалом так і у порівнянні з CPU, GPU та аналогами TPU від інших компаній

### 1. Використання тензорів у машинному навчанні

Тензор — об'єкт лінійної алгебри, лінійно перетворюючий елемент одного лінійного простору в елементи другого. Окремим випадками тензорів є скаляри, вектори, білінійні форми і т. п.[4]

Часто тензори представляють багатовимірну таблицю  $d \times d \times \dots \times d$  заповнену числами — компонентами тензора (де  $d$  — розмірність векторного простору, над яким задано тензор, кількість множників співпадає з так званою валентністю чи рангом тензора).

У комп'ютерних науках тензор — це багатовимір-на матриця аналогічна NumPy масиву — фундаментальній структурі даних, яка використовується в алгоритмах машинного навчання. Це основна одиниця операцій у фреймворку TensorFlow, який використовує NumPy.

TensorFlow — фреймворк представлений компанією Google в 2015 році [15], який призначений для проектування, створення і вивчення нейромереж-них моделей. Він використовується для того, щоб здійснювати обчислення, реалізовані за допомогою графів потоків даних. У цих графах вершини представляють собою математичні операції, в той час як ребра — є даними, які зазвичай подаються у вигляді багатовимірних масивів або тензорів.

Бібліотеки TensorFlow помітно спрощують вбудовування в додатки елементів, які самонавчаються, та функцій штучного інтелекту, призначених для організації роботи комп'ютерного зору, обробки природної мови тощо.

Звичайно, TensorFlow не єдина бібліотека машинного навчання, але, як і пошуковий механізм Google, вона вважається кращою в своєму класі. Альтернативами є програмне забезпечення Torch, створене швейцарськими дослідниками, а також Caffe, розроблена Каліфорнійським університетом у Берклі.

NumPy — це модуль з відкритим кодом для мови програмування Python[5], який надає загальні математичні та числові операції у вигляді попередньо скомпільованих швидких функцій. Вони об'єднуються в високорівневі пакети, що забезпечує функціонал, який можна порівняти з функціоналом MatLab. Причиною його використання у TensorFlow є надання швидких методів для маніпуляції великими масивами та матрицями.

Алгоритми машинного навчання (інакше нейромережовий алгоритм) частіше за все використовують операції додавання та множення наступних об'єктів:

- скаляри;
- вектори;
- матриці.

Для прикладу розглянемо основні етапи роботи абстрактного алгоритму машинного навчання: початковий, класифікація та завершення.

На початковому етапі усі вхідні дані нормуються, наприклад, якщо це зображення, то відбувається уніфікація розмірів, рівня насиченості, тощо.

На основі цих даних ключова стадія будь-якого алгоритму — класифікація. Власне вирішення цієї задачі і пов'язане з тензорами.

Для прикладу приведемо алгоритм класифікації Метод опорних векторів, інакше SVM [6], який наразі часто використовується.

Виходячи з того, що об'єкт, який знаходиться в багатовимірному просторі, відноситься до одного з двох класів, алгоритм будує гіперплощину, що має мірність на 1 меншу, таким чином щоб усі об'єкти опинилися в одній з двох груп. Окрім цієї сепарації, гіперплощина має бути максимально віддаленою від найближчого об'єкта кожної групи. Для цього алгоритм шукає точки на графіку, які розташовані найближче до лінії поділу. Ці точки називаються опорними векторами. Потім, алгоритм обчислює відстань між опорними векторами і розділяє їх площиною. Ця відстань називається зазором. Основна мета алгоритму — максимізувати міру зазору.

Після подібної класифікації вхідних об'єктів на основі отриманого результату формуються прогнозні значення, яких не вистачає для вирішення поставленої задачі — це і є завершальний етап, на якому тренується нейромережа. Він також пов'язаний з тензорною алгеброю.

Для того щоб його пройти кожен нейрон нейромережі здійснює наступні розрахунки:

- вхідні дані  $x$  множаться з вагами  $w$ , задля обчислення сили сигналу;
- цей результат додається, задля агрегації стану нейрону;
- після цього застосовується активаційна функція  $f()$ , задля того, щоб спровокувати активність штучного нейрону.

Власне схему входів та нейронів зображено на рис. 1.

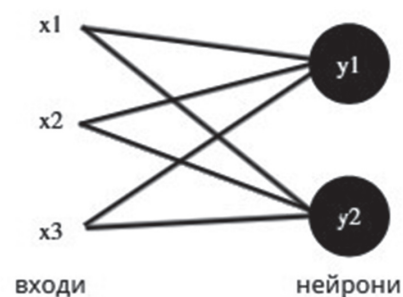


Рис. 1. Схема входів та нейронів

Як можна бачити на Рис. 1, з трьома входами та двома нейронами в повнозв'язній однорівневій нейронній мережі, необхідно виконати 6 операцій множення між вагами та входами, об'єднавши множники у дві групи по 3 за допомогою засобів додавання.

Ця послідовність множення та додавання може бути записана у вигляді матричного множення, що з обчислювального боку є найбільш навантаженою частиною даного етапу.

Кожне передбачення вимагає багато кроків множення входів матриці ваги та застосування активісної функції.

У результаті, множення та зрізи масивів даних або створюють велике навантаження на процесор або вимагають значних обсягів пам'яті для реалізації.

TPU був спроектований таким чином, щоб знизити навантаження на процесор, не вимагаючи значних обсягів додаткової пам'яті.

## 2. Логіка TPU

Проблему прискорення процесу тренування нейронної мережі без втрат якості TPU вирішує декількома методами [7]:

### 1. Квантування

Разом з технікою квантування відбувається процес апроксимації випадкового значення між заданим мінімумом та максимумом у 8-бітному вигляді, TPU містить 65,536 8-бітних множників. У своїй суті ця техніка — це стискання 32-бітних чисел з плаваючою точкою чи 16-бітних у 8-бітний вигляд. Квантування — це перший засіб, який використовує TPU для зниження витрат при виконанні передбачення за допомогою нейромереж, без значних втрат у швидкості.

### 2. Увага до обчислень

Архітектура TPU інкапсулює сутність обчислення у нейронних мережах, за допомогою наступних обчислювальних ресурсів:

Matrix Multiplier Unit (MMU): 65,536 8-бітних процесорів множення та додавання для матричних операцій;

Unified Buffer (UB): 24 мегабіти статичної оперативної пам'яті з довільним доступом, яка працює в якості регістрів;

Activation Unit (AU): провідні функції активації.

Усе це керується високорівневими інструкціями, які відповідають за основні математичні операції, що потрібні для роботи нейронних мереж. Спеціальний компілятор та програмний стек транслює запити API з графу Tensor Flow у інструкції до TPU.

### 3. Паралельна обробка

Типові процесори зі скороченим набором команд (RISC-процесори) надають інструкції для простих обчислень таких як множення, обробкою одиничної та скалярної операції кожної інструкції. Як вже було

сказано, TPU містить MMU, що спроектований як матричний, а не скалярний процесор. Це дозволяє обробляти сотні тисяч операцій за один тик. Існує багато яскравих ілюстрацій цього процесу, наприклад, друк документа у цілому, а не по рядку.

### 4. Систолічний масив

Основою матричного процесору MMU є систолічний масив (systolic array). У традиційній архітектурі (такій як CPU чи GPU), значення зберігаються у регістрах, програма вказує арифметико-логічному пристрою на ті регістри, які необхідно зчитати, які виконати операції, та у які регістри розмістити результат. Фактично, програма є послідовністю подібних операцій.

В MMU перемноження матриць використовує вхідні дані декілька разів для того, щоб отримати вихідний результат. Інакше кажучи, значення зчитуються один раз, але використовуються декілька разів для різних операцій, при цьому без зберігання в регістри. Тобто арифметико-логічний прилад виконує багато операцій множення та додавання, однак за фіксованими шаблонами.

### 3. TPU як служба хмарної платформи Google

Одним з найважливіших характеристик TPU від Google є те, що компанія зробила його доступним в якості служби на своїй хмарній платформі. Як результат, даний TPU дозволяє запускати робочі навантаження на прискорювачі Google TPU з використанням Tensor Flow. Згодом це навантаження розподіляється на хмарний сервер, так як це показано на рис.2.

Як зазначають автори: хмарний TPU має на меті допомогти дослідникам та розробникам у створенні обчислювальних кластерів Tensor Flow.

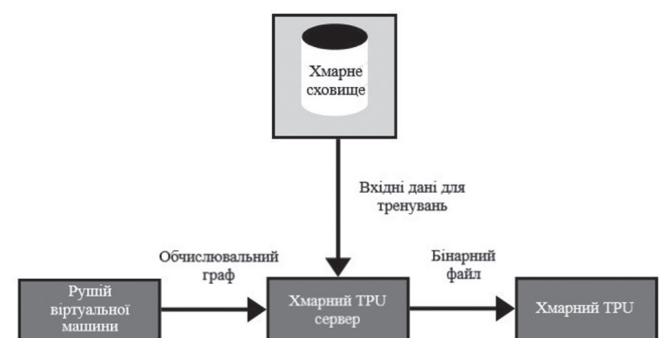


Рис. 2. Розподіл навантаження на сервері

Що стосується самого процесу програмування моделі, то тут варто відмітити, що передача даних між хмарним TPU та пам'яттю хоста відбувається повільніше у порівнянні зі швидкістю обчислень (це наслідок використання PCIe шини). Як наслідок можна спостерігати простоювання TPU. Розв'язання цієї проблеми передбачає наступні особливості:

— усі параметри моделі зберігаються у вбудованій пам'яті з високою пропускнуною здатністю;

– багато етапів навчання моделі виконуються в циклі, амортизуючи вартість запуску обчислень у хмарному TPU;

– Tensor Flow витягує та попередньо оброблює дані перед передачею на обладнання хмарного TPU;

– ядра хмарного TPU синхронно виконують ідентичну програму, яка зберігається у їх власному відповідному слоті пам'яті з високою пропускнуою здатністю (HBM).

#### 4. Переваги та обмеження TPU

Використання TPU від Google надає ряд переваг з точки зору підвищення ефективності та швидкості обчислень, включаючи наступні [8]:

– покращення продуктивності лінійно алгебраїчних обчислень, які активно використовуються у машинному навчанні;

– мінімізація часу навчання за фіксованою точністю результатів при навчанні великих складних моделей нейронних мереж;

– збільшення швидкості отримання вихідних даних за рахунок масштабування операцій на хмарних серверах із TPU.

Варто зазначити, що TPU були спеціально оптимізовані для швидкого виконання великої кількості матричних множень. Відповідно, у ситуаціях, коли матричне множення не є превалюючим, використання TPU не дає бажаного результату. Наприклад, це наступні ситуації [9]:

– програми лінійної алгебри з великою кількістю розгалужень;

– програми, які не часто звертаються до пам'яті;

– навантаження, які вимагають високоточних арифметичних обчислень, зокрема операції з числами з плаваючою точкою;

– навантаження, що містять користувацькі операції Tensor Flow, написані на C++.

#### 5. Обмеження CPU та GPU при роботі з нейронними мережами

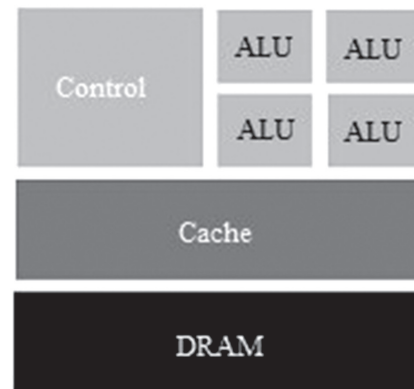
Для того аби проаналізувати важливість нового процесору для машинного навчання, розглянемо інші види процесорів, про які згадувалося раніше — центральний (CPU) та графічний (GPU).

##### 1. Центральний процесор

CPU — процесор загального призначення, побудований на архітектурі фон Неймана (зображений на Рис.3)[10, 16].

З цього визначення можна зробити висновок, щодо головної переваги процесору — гнучкості. Завдяки якій є можливість звантажувати різноманітне програмне забезпечення, що вирішує велику кількість завдань користувачів: обробка текстів, класифікація зображень за допомогою нейронних мереж, проведення банківських транзакцій тощо.

Однак, в наслідок подібної гнучкості, порядок операцій не є заздалегідь визначеним, отже існують накладні витрати пов'язані з операцією зчитування даних з програмного забезпечення. З цим також пов'язана необхідність зберігати усі обчислення в регістрах процесору (або у кеші першого рівня), що лише поглиблює недолік архітектури у розрізі роботи алгоритмів машинного навчання. Оскільки у них більшість операцій є заздалегідь визначеними та повторюваними.



CPU

Рис. 3. Архітектура CPU

##### 2. Графічний процесор

Головною відмінністю графічного процесору [11] є те, що за подібної архітектури (Рис. 4), використовується близько 2,500-5,000 арифметико-логічних пристроїв — це дозволяє виконувати тисячі операцій множення та додавання одночасно, надаючи можливість досягнути високого рівня паралелізму, а відповідно, продуктивності.



CPU

Рис. 4. Архітектура GPU

Зазначена вище особливість зумовила широке використання графічних процесорів при роботі з нейронними мережами. Однак у подібній архітектурі

є значний недолік. Оскільки GPU виконує велику кількість паралельних обчислень, то він також використовує пропорційно більше енергії на доступ до пам'яті. Окрім цього, як і CPU цей процесор не є спеціалізованим для роботи з нейромережами, не зважаючи на загальну популярність. І хоча деякі серії обох видів процесорів підтримують роботу з ключовими фреймворками для машинного навчання, вони поступаються у швидкості та точності TPU.

## 6. Порівняння TPU з CPU та GPU

Розглянувши сутність CPU та GPU, здійснимо порівняння з Google TPU 3-го покоління, на прикладі Intel Skylake CPU [1] та NVIDIA's V100 GPU [2]. Для цього були обрані наступні критерії: пам'ять (обсяг та тип), максимальна продуктивність, максимальне енергоспоживання, шина даних та пропускна здатність при навчанні кумулятивної нейронної мережі.

### 1. Пам'ять

У випадку центрального процесору від Intel наявна пам'ять обсягом 120 GB типу DDR4SDRAM (синхронний динамічний оперативно запам'ятовуючий пристрій четвертого покоління з подвійною швидкістю передачі даних). Однак ця пам'ять є не настільки швидкою як у випадку GPU та TPU, що містять пам'ять з високою пропускною здатністю (HBM). Для першого — 16 гігабайт, для другого — 32. Подібний стан речей надає тензорному процесору від Google конкурентні переваги.

### 2. Максимальна продуктивність

Процесор від Intel досягає максимально продуктивності у 32 терафлопси одиначної точності, тоді як NVIDIA's V100 GPU 125 терафлопсів. Як бачимо, графічний процесор все ж потужніший за центральний, однак у випадку Google TPU максимальна продуктивність знаходиться на рівні 180 терафлопсів, що вказує на більшу ефективність тензорного процесору.

### 3. Максимальне енергоспоживання

У енергоспоживанні TPU також має конкурентні переваги — споживання на рівні 200 ватт, тоді як у графічного процесору — більше 300 ватт, а у центрального — 250. Грунтуючись на чинному та попередньому критерії, необхідно зауважити, що тензорний процесор має найбільший показник продуктивності на одиницю енергії — 0.9 терафлопсів на ватт. У той же час у CPU — 0.128, а у GPU — 0.42.

### 4. Пропускна здатність

За цим критерієм тензорний процесор поступається графічному — 128 гігабіт за секунду для TPU та близько 300 гігабіт за секунду для GPU. Стосовно Skylake, то пропускна здатність цих процесорів досягає 60 гігабіт за секунду.

### 5. Шина даних

У кожному процесорі застосовується PCIe-шина 3-го покоління, тож чинний критерій не впливає на пропускну здатність.

Таким чином TPU від Google чинного покоління має переваги майже за усіма критеріями, окрім пропускної здатності, що і зумовлює обмеження названі у пункті 7.

## 7. Конкуренти Google TPU

Зважаючи на високу ефективність тензорних процесорів при вирішенні задач машинного навчання, велика кількість компаній займалася розробкою власних моделей TPU. Найвідомішою з них можна вважати розробку китайської компанії Huawei Ascend 910 [12], яку ті представили в 2019 році. Ascend 910 — це однокристальний процесор з широкими можливостями інтеграції та продуктивністю до 256 терафлопсів, я той час як процесор від Google досягає лише 180 терафлопсів. Крім ядер, які орієнтовані на вирішення задач машинного навчання, процесор містить у собі і звичайний центральний процесор, і планувальник задач з технологією DVPP — віртуальною динамічною системою електропостачання. Це дозволяє процесору самостійно керувати власною роботою, аби максимально використовувати обчислювальну потужність.

Зазначений процесор має працювати з новим фреймворком MindSpore від компанії Huawei, що вийшов у 1-му кварталі 2020 року та поширюється як проект з відкритим кодом в рамках стратегії компанії, спрямованої на розширення впровадження машинного навчання та допомогу розробникам.

Задля порівняння процесорів від Google та Huawei виокремимо кілька критеріїв, виключаючи вже названу продуктивність. До них можна віднести: максимальне енергоспоживання, пам'ять, використовувана шина даних, пропускна здатність цієї шини:

### 1. Максимальне енергоспоживання

TPU від компанії Google споживає значно менше електроенергії 200 ватт проти 310 ватт у Huawei, що є певною перевагою для Google. Однак, з огляду на наявність DVPP ця перевага нівелюється.

### 2. Пам'ять

В обох випадках використовується пам'ять з високою пропускною здатністю (HBM) обсягом 32 гігабайти, однак у Huawei вона працює швидше, оскільки містить подвійний чіп на додаткові 16 гігабайт.

### 3. Шина даних

Зазначена раніше проблема Google TPU, де використовуються PCIe-шина 3-го покоління, вирішується у процесорі від Huawei, оскільки ті працюють з 4-им, більш швидким, поколінням PCIe-шини.

### 4. Пропускна здатність

У цій категорії Google TPU також поступається, оскільки має пропускну здатність 128 гігабіт у секунду, в той час як Ascend 910 — 240 гігабіт у секунду.

Як бачимо, тензорний процесор від компанії Google нинішнього покоління є слабшим майже за усіма показниками, проте його реліз відбувся

в середині 2018 року, на противагу кінцю 2019 року для процесору від Huawei. Також Huawei на момент написання чинною статті, не здійснили розміщення власної розробки на хмарній платформі, що не дає можливості для використання у корпоративних цілях, показуючи більшу цінову конкурентоздатність Google TPU.

### Висновки

В статті здійснений огляд тензорного процесору від компанії Google, його особливості та переваги при навчанні нейронних мереж за фіксованої точності результатів. Здійснено порівняння технічних характеристик TPU з GPU від NVIDIA та CPU від Intel на прикладі роботи з кумулятивною нейромережею, що показало значну перевагу розробки Google над іншими видами процесорів, зокрема, у одному з найважливіших показників, продуктивності на одиницю енергії. Також зроблено порівняння з TPU від Huawei, виходячи з анонсованих китайською компанією характеристик, які вказують на те, що тензорний процесор від Google поступається конкуренту у потужності, однак надання можливості користування TPU на хмарній платформі, нівелює переваги процесору від Huawei перед користувачами, які не мають корпоративних можливостей купівлі власного TPU.

### Список літератури:

- [1] *Arafa M. et al.* Cascade lake: Next generation intel xeon scalable processor //IEEE Micro. – 2019. – Т. 39. – №. 2. – С. 29-36.
- [2] NVIDIA Tesla V100 GPU architecture [Електронний ресурс] // NVIDIA. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://images.nvidia.com/content/volta-architecture/pdf/volta-architecture-whitepaper.pdf>.
- [3] *Goldsborough P.* A tour of tensor flow //arXiv preprint arXiv:1610.01178. – 2016.
- [4] *Вильчевская Е. Н.* Тензорная алгебра и тензорный анализ //СПб.: Изд-во Политехнического ун-та. – 2012.
- [5] *McKinney W.* Python for data analysis: Data wrangling with Pandas, NumPy, and IPython. – “ O’Reilly Media, Inc.”, 2012.
- [6] *Ray S. et al.* Understanding Support Vector Machine algorithm from examples (along with code) //Analytics Vidhya. – 2017. – Т. 13. – С. 19.
- [7] *Hemsoth N.* First In-Depth Look at Google’s TPU Architecture //The Next Platform, Apr. – 2017. – Т. 5. – С. 13.
- [8] *Kennedy P.* Google Cloud TPU Details Revealed [Електронний ресурс] / Patrick Kennedy // STH. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.servethehome.com/google-cloud-tpu-details-revealed/>.
- [9] *Dean J., Hölzle U.* Build and train machine learning models on our new google cloud tpus, 2017 //URL <https://www.blog.google/topics/google-cloud/google-cloud-offer-tpu-machine-learning>. – 2017.
- [10] NVIDIA [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.geforce.com/hardware/desktop-gpus/geforce-gtx-690/specifications>.
- [11] *Rowe J.* The Continuing Importance of GPUs For More Than Just Pretty Pictures //Haettu. – 2017. – Т. 31. – С. 2019.
- [12] Процесор Ascend 910 [Електронний ресурс] . – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://e.huawei.com/ru/products/cloud-computing-dc/atlas/ascend-910>.
- [13] *Jouppi N. P. et al.* In-datacenter performance analysis of a tensor processing unit //Proceedings of the 44th Annual International Symposium on Computer Architecture. – 2017. – С. 1-12.
- [14] *Osborne J.* Google’s tensor processing unit explained: this is what the future of computing looks like //TechRadar. Available via <http://www.techradar.com/>. Accessed. – 2017. – Т. 6.
- [15] *Abadi M. et al.* Tensorflow: Large-scale machine learning on heterogeneous distributed systems //arXiv preprint arXiv:1603.04467. – 2016.
- [16] CUDA C++ Programming Guide [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://docs.nvidia.com/cuda/cuda-c-programming-guide/index.html>.

Надійшла до редколегії 25.05.2020

УДК 53.083.91

DOI 10.30837/bi.2020.1(94).14

Н.В. Хмель<sup>1</sup>, А.Л. Алтухов<sup>2</sup>, В.Г. Колесников<sup>3</sup>, А.А. Алтухов<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Кандидат биологических наук, доцент кафедры биомедицинской инженерии,  
Харьковский национальный университет радиоэлектроники,  
просп. Науки, 14, Харьков, 61166, Украина, khmilnatali@gmail.com,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7916-5921>

<sup>2</sup>Кандидат медицинских наук, заведующий рентгенологическим отделением,  
Государственное учреждение “Национальный институт терапии имени Л. Т. Малой  
Национальной академии медицинских наук Украины”, просп. Любви Малой, 2а,  
Харьков, 61039, Украина, therapy@amnu.gov.ua

<sup>3</sup>Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник,  
Институт радиопроизводства и электроники им. А.Я. Усикова Национальной академии наук Украины,  
ул. Ак. Проскуры, 12, Харьков, 61085, Украина, kolesnik@ire.kharkov.ua,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7822-4774>

<sup>4</sup>Кандидат фармацевтических наук, доцент кафедры аналитической химии,  
Национальный фармацевтический университет, ул. Пушкинская, 53, г. Харьков, 61002,  
Украина, mail@nuph.edu.ua

## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТРАНСДУКЦИИ КЛЕТОЧНОГО СИГНАЛА МЕТОДОМ МИКРОВОЛНОВОЙ ДИЭЛЕКТРОМЕТРИИ ПРИ ДИЛАТАЦИОННОЙ КАРДИОМИОПАТИИ

Представлены результаты обработки трансдукции клеточного сигнала в эритроцитах в условиях физиологической нормы и при развитии дилатационной кардиомиопатии. Проведена апробация метода микроволновой диэлектromетрии для визуализации электромагнитного сигнала от суспензии эритроцитов с помощью “sweep”-режима пьезо-кюветы в звуковом диапазоне частот  $f=10\div 12000$  Гц. Оценивалась гидратация эритроцитов по параметру реальной части комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  на частоте 37.7 ГГц. Использование стимулятора и модулятора  $\beta$ -адренергических рецепторов – адреналина и простагландина  $E_2$  позволило смоделировать нарушение в системе трансдукции клеточного сигнала через аденилатциклазную систему эритроцитов *in vitro*. Анализ спектров электромагнитного отклика эритроцитов в “sweep”-режиме регистрировал отличия  $\epsilon'$  в интактных и опытных образцах, а также при скрининге используемых добавок. Проведена верификация диэлектрических данных с данными эхокардиографии и рентгенографии, что позволило рекомендовать микроволновую диэлектromетрию как один из методов неинвазивной оперативной диагностики дилатационной кардиомиопатии.

**ЭРИТРОЦИТЫ, ДИЛАТАЦИОННАЯ КАРДИОМИОПАТИЯ, ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ, МИКРОВОЛНОВАЯ ДИЭЛЕКТРОМЕТРИЯ**

Представлені результати обробки трансдукції клітинного сигналу в еритроцитах в умовах фізіологічної норми і при розвитку дилатативної кардіоміопатії. Проведено апробацію методу мікрохвильової діелектromетрії для візуалізації електромагнітного сигналу від суспензії еритроцитів за допомогою «sweep»-режиму п'єзо-кювети в звуковому діапазоні частот  $f=10\div 12000$  Гц. Оцінювалася гідратація еритроцитів по параметру реальної частини комплексної діелектричної проникності  $\epsilon'$  на частоті 37.7 ГГц. Використання стимулятора і модулятора  $\beta$ -адренергічних рецепторів – адреналіну і простагландину  $E_2$  дозволило змоделювати порушення в системі трансдукції клітинного сигналу через аденилатциклазну систему еритроцитів *in vitro*. Аналіз спектрів електромагнітного відгуку еритроцитів в «sweep»-режимі реєстрував відмінності  $\epsilon'$  в інтактних і дослідних зразках, а також при скринінгу використаних добавок. Проведена верифікація діелектричних даних з даними ехокардіографії і рентгенографії, що дозволило рекомендувати мікрохвильову діелектromетрію як один із методів неінвазивної оперативної діагностики дилатативної кардіоміопатії.

**ЕРИТРОЦИТЫ, ДИЛАТАЦИОННАЯ КАРДИОМИОПАТИЯ, ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ, МИКРОВОЛНОВАЯ ДИЭЛЕКТРОМЕТРИЯ**

The results of processing the transduction of the cell signal in erythrocytes under physiological conditions and during development of dilated cardiomyopathy are presented. The microwave dielectrometry method was tested to visualize the electromagnetic signal from a suspension of erythrocytes using the “sweep”-regime of a piezoelectric cell in the sound frequency range  $f=10\div 12000$  Hz. Erythrocyte hydration was estimated by the parameter of the real part of the complex permittivity  $\epsilon'$  at a frequency of 37.7 GHz. The use of a stimulator and modulator of  $\beta$ -adrenergic receptors – adrenaline and prostaglandin  $E_2$  allowed us to simulate a violation in the system of transduction of the cell signal through the adenylate cyclase system of erythrocytes *in vitro*. Analysis of the erythrocyte's electromagnetic response spectra in the “sweep”-regime recorded differences in the intact and experimental samples, as well as during the screening of the additives used. The dielectric data were verified with the data of echocardiography and radiography, which made it possible to recommend microwave dielectrometry as one of the methods of non-invasive operative diagnosis of dilated cardiomyopathy.

**ERYTHROCYTES, DILATED CARDIOMYOPATHY, DIELECTRIC PERMEABILITY, MICROWAVE DIELECTROMETRY**

## Введение

Система внутриклеточной и межклеточной сигнализации обеспечивается сложными коммуникативными связями и когнитивными взаимодействиями между реагирующими звеньями, которые обуславливают эффективность метаболизма в условиях физиологической нормы и изменяются при патологии различного генеза. При этом клетка рассматривается как биосенсор, который получает, дифференцирует, а также обрабатывает, усиливает и выдает результирующую информацию на влияние определенного физико-химического фактора.

Разнообразные подходы к обработке информации, поступающей в биологическую систему клетки, стали возможны благодаря современным технологиям с аналого-цифровой обработкой сигналов, микропроцессорной технике в медицинской аппаратуре, компьютерному планированию, а также моделированию с использованием расчетных данных молекулярной динамики и метода Монте–Карло [1-3]. Привлечение современных автоматизированных инженерных инструментов (CASE – computer-aided software engineering tools), с помощью которых есть возможность строить диаграммы потока информации (DFDs – dataflow diagrams) и учитывать огромный поток поступающей и выходящей через цитоплазматическую мембрану клетки информации, также способствуют прецизионному анализу ее структурно-функциональных особенностей.

Цитоплазматическая мембрана клетки является совершенно организованной структурой, которая реализует многие функциональные задачи клетки, состоящие, прежде всего, в передаче и проведении информации, а также в осуществлении строгого обмена веществом и энергией с окружающей её внешней средой [4]. При этом, клеточный гомеостаз поддерживается регуляторными трансмембранными рецепторными системами, ионоселективными каналами и элементами диффузионных транспортных систем, а также электромагнитным и электростатическим полем мембраны. Это, в целом, обеспечивает слаженную внутриклеточную сигнализацию и работу функциональных систем [5-7].

Достичь понимания биологических и физико-химических закономерностей, которые определяют систему клеточной трансдукции, не представляется возможным без детальных исследований особенностей взаимодействия белковых макромолекул с водой. Белки функционируют в водной среде и эволюционно адаптированы к ней. Вода имеет принципиально важное значение, как в формировании активного состояния рецепторов, определяя их структуру и динамику [8, 9], так и участвует в регуляции специфического связывания внеклеточных сигнальных лигандов с рецепторами [10].

Понятие гидратации характеризуется как образование комплекса атомов или молекул с водой в виде устойчивого кристаллогидрата в определенном стехиометрическом соотношении. Гидратная оболочка гетерогенна по структурным и энергетическим признакам, она отражает структурно-динамические свойства макромолекул, результатом которых является перераспределение между количеством связанной с биополимерами воды и свободной водой [11].

Связанная вода, представляет собой слой, состоящий из десятков молекулярных слоев воды, формирующих водородные связи, как с полярными группами белка, так и между собой. Молекулы этого слоя обладают коллективными свойствами, пониженной подвижностью и временем релаксации около  $t=10^{-9}$ сек. Меньшая диэлектрическая проницаемость связанной воды, по сравнению со свободной водой, объясняется с точки зрения молекулярно-динамических изменений вращательной подвижности диполей воды, и является результатом усиления энергии межмолекулярных связей в структуре связанной воды, что подтверждается методами неупругого рассеяния нейтронов и ядерного магнитного резонанса [12]. Свободная вода, напротив, частично взаимодействует с удаленными от внутренней части глобулы белка полярными аминокислотными остатками, и отличается по своим физико-химическим свойствам от связанной воды, в первую очередь, энергиями электронных, колебательных и особенно вращательных переходов, что отражается на увеличении диэлектрической проницаемости и уменьшении времени релаксации до  $t=10^{-11}$ сек [13].

Известно, что гидратация макромолекулярных комплексов мембраны играет существенную роль в трансдукции клеточных сигналов, которые интенсивно исследуются в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах электромагнитного спектра [14, 15]. Характер и скорость взаимодействия электромагнитной волны с биологической системой клетки определяется, как параметрами излучения, а именно частотой излучения, скоростью распространения, когерентностью колебания, поляризацией волны, так и физическими свойствами биологической системы, как среды, в которой распространяется электромагнитная волна, а именно электрической проводимостью и диэлектрической проницаемостью. Эти физические параметры позволяют оцифровать пространственно-конформационные изменения, происходящие на макромолекулярных структурах клетки в реальном времени, что особенно важно для решения многих медико-биологических задач.

В данной работе рассматривается целесообразность использования микроволновой диэлектротометрии в диагностике дилатационной кардиомиопатии (ДКМП), которая рассматривается как социально

значимая проблема современного общества, с частотой встречаемости 7.3-8.3 случая на 100 тыс. населения, что составляет до 50 % идиопатических кардиомиопатий [16]. Среди известных факторов риска развития ДКМП выделяют персистирующие воспалительные процессы, кардиотоксические, генетические факторы, а также аутоиммунные реакции, что связано, в определенной мере, с нарушением функционирования адренорецепторного комплекса цитоплазматической мембраны клеток, гетеротримерных G-белков и, в целом, аденилатциклазной системы [17].

Инструментальная и лабораторная диагностика ДКМП, основанная на результатах комплексного обследования пациента, вызывает определенные затруднения. Это связано с асимптомным течением заболевания и завуалированным общими симптомами недомогания и манифестирующими болями в области сердца истинным состоянием пациента, при котором симптоматика кардиомиопатии может начаться внезапно [18]. В связи с этим наибольшую актуальность приобретает разработка новых, высокоинформативных методов ранней диагностики и степени тяжести ДКМП, прогноза течения заболевания, а также контроля над эффективностью лечебных мероприятий. Современная отечественная техническая база способствует биоинженерным разработкам в этом направлении, для того чтобы надежно определять механизмы изменения клеточной регуляции и возникновение молекулярных дефектов в функционировании адренергических рецепторов кардиомиоцитов. Оперативное тестирование клеточных механизмов регуляции до клинических проявлений

заболевания сердца особенно важно, так как дает возможность выдать прогноз за несколько суток до возникновения кризисной ситуации и, тем самым, предупредить скоротечность событий при некрозе кардиомиоцитов в случае, например, острого инфаркта миокарда [19].

Поэтому цель настоящей работы состояла в рассмотрении эффективности применения аппаратно-регистрирующего комплекса на основе микроволновой диэлектromетрии для визуализации процессов трансдукции клеточного сигнала в области  $\gamma$ -дисперсии диэлектрической проницаемости свободной воды для ранней диагностики дилатационной кардиомиопатии.

### 1. Материалы и методы исследования

#### 1.1. Методика измерения в области $g$ -дисперсии диэлектрической проницаемости свободной воды

Комплексная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon^* = \epsilon' + i\epsilon''$  характеризует свойство молекул поляризовываться в электрическом поле. В переменном электромагнитном поле в диапазоне высоких частот  $f = 10 \div 50$  ГГц (область дисперсии диэлектрической проницаемости свободной воды), наблюдается поляризация молекул воды, из-за свойственной ей инерционности; диполи воды начинают отставать от поляризующего поля. В токе смещения появляется компонента, сдвинутая по сравнению с поляризующим полем на  $90^\circ$ . Вследствие этого реальная часть комплексной диэлектрической проницаемости воды  $\epsilon'$  уменьшается с 80.36 до 4.32 (в системе СГС) Как видно с рисунка 1, на используемой в эксперименте частоте  $f=37.7$  ГГц, значение  $\epsilon'$  воды при температуре  $t=20^\circ\text{C}$  составляет 22; значение  $\epsilon'' = 28$ .

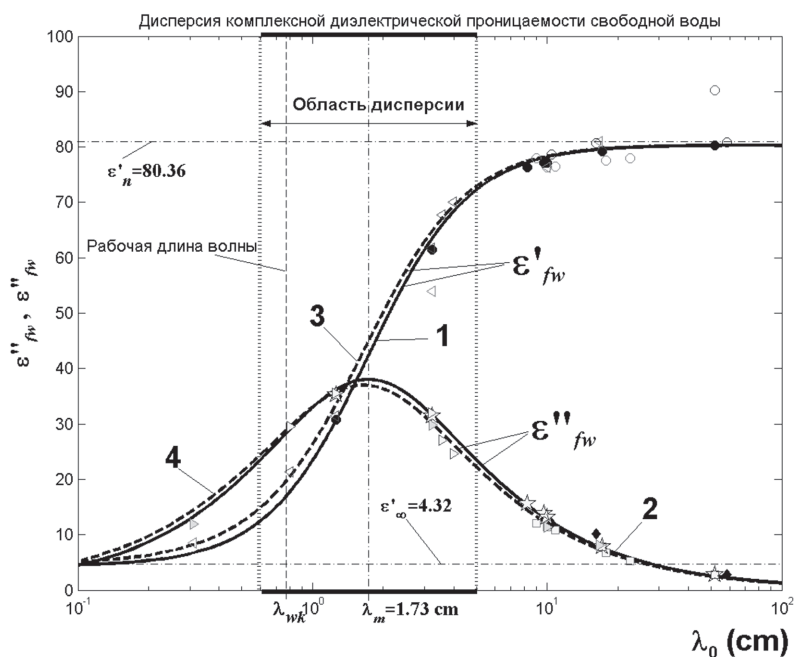


Рис. 1. Значения реальной  $\epsilon'_{fw}$  (кривые 1 и 3) и мнимой  $\epsilon''_{fw}$  (кривые 2 и 4) частей комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon^*_{fw}$  свободной воды, полученные при помощи моделей Дебая (сплошные линии 1 и 2), Коула-Девидсона (штриховые линии 3 и 4); точками различной конфигурации обозначены экспериментальные данные различных авторов

Существует значительное число моделей, описывающих дисперсию диэлектрических свойств полярных жидкостей [20]. Самые известные из них – это модели Дебая, Коула-Коула, Коула-Девидсона. Предложенная эмпирическая формула Коула-Девидсона, охватывает большое количество жидкостей, в том числе тех, к которым соотношения Дебая непосредственно не применимы.

$$\varepsilon_{f_w}^* - \varepsilon'_\infty = \frac{\varepsilon'_n - \varepsilon'_\infty}{\left(1 + i \frac{\lambda_m}{\lambda_0}\right)^\beta},$$

где  $\varepsilon_{f_w}^*$  – комплексная диэлектрическая проницаемость изучаемой жидкости,  $\varepsilon'_n$  – предельная длинноволновая диэлектрическая проницаемость,  $\varepsilon'_\infty$  – предельная коротковолновая диэлектрическая проницаемость,  $\lambda_0$  – рабочая длина волны,  $\lambda_m$  – длина волны, соответствующая максимуму поглощения и связанная с макроскопическим временем релаксации  $\tau$ ,  $\beta$  – эмпирический параметр, изменяющийся в пределах  $0 \leq \beta \leq 1,0$  и связанный с коэффициентом распределения времён релаксации.

Для действительной  $\varepsilon'_{f_w}$  и мнимой  $\varepsilon''_{f_w}$  частей  $\varepsilon_{f_w}^*$  получаем

$$\varepsilon'_{f_w} = \varepsilon'_\infty + (\varepsilon'_n - \varepsilon'_\infty)(\cos \xi)^\beta \cos \beta \xi;$$

$$\varepsilon''_{f_w} = (\varepsilon'_n - \varepsilon'_\infty)(\cos \xi)^\beta \sin \beta \xi,$$

где  $\xi = \arctg \frac{\lambda_m}{\lambda_0}$ .

Очевидно, что при  $\beta = 1,0$  это соотношение переходит в хорошо известное уравнение Дебая, из которого следует

$$\varepsilon'_{f_w} = \varepsilon'_\infty + \frac{(\varepsilon'_n - \varepsilon'_\infty)}{1 + \left(\frac{\lambda_m}{\lambda_0}\right)^2}; \quad \varepsilon''_{f_w} = \frac{(\varepsilon'_n - \varepsilon'_\infty)}{1 + \left(\frac{\lambda_m}{\lambda_0}\right)^2} \left(\frac{\lambda_m}{\lambda_0}\right).$$

Параметры  $\varepsilon'_n$ ,  $\varepsilon'_\infty$  и  $\lambda_m$  определяются по данным микроволновой диэлектрметрии для каждого конкретного вещества. Для случая свободной воды численные значения параметров моделей Коула-Девидсона и Дебая представлены в таблице 1.

Таблица 1

Значения параметров моделей Коула-Девидсона и Дебая для свободной воды

Параметр	Значение параметра
Температура $t$ °С	~ 20 °С
предельная длинноволновая диэлектрическая проницаемость $\varepsilon'_n = \varepsilon'_{f_w}(\lambda_0 \rightarrow \infty)$	80.36
предельная коротковолновая диэлектрическая проницаемость $\varepsilon'_\infty = \varepsilon'_{f_w}(\lambda_0 \rightarrow 0)$	4.32
длина волны $\lambda_m$	1.73 см

Абсолютные значения реальной  $\varepsilon'_{f_w}$  и мнимой  $\varepsilon''_{f_w}$  частей комплексной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{f_w}^*$  свободной воды при выбранном значении рабочей длины волны  $\lambda_0 = \lambda_{wk}$  приведены в таблице 2.

Таблица 2

Абсолютные значения реальной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости при выбранном значении рабочей длины волны

Модель дисперсии	$\beta$	Рабочая длина волны $\lambda_{wk}$	$\varepsilon'_{f_w}$	$\varepsilon''_{f_w}$
Дебая	1.0	7.56 мм	16.51	27.90
Коула-Девидсона	0.94	7.56 мм	19.22	28.50

Из таблицы 2 следует, что на рабочей длине волны  $\lambda_{wk} = 7.56$  мм с экспериментом лучше совпадают значения  $\varepsilon'_{f_w}$  из модели Коула-Девидсона;  $\varepsilon''_{f_w}$  из модели Дебая [21].

В отличие от области дисперсии диэлектрической проницаемости свободной воды ( $\gamma$ -дисперсия), релаксационные процессы полярных органических биополимеров, таких как белковые макромолекулы, лежат в диапазоне частот  $1 \text{ МГц} < f < 10 \text{ МГц}$  ( $\beta$ -дисперсия), при  $\alpha$ -дисперсии происходит поляризация целых клеток, что соответствует области низких частот  $0,1 \text{ кГц} < f < 100 \text{ кГц}$ , поэтому вклад этих компонентов в релаксацию молекул воды незначителен.

### 1.2. Метод микроволновой диэлектрметрии

Одним из основных технологически обеспеченным участком  $\gamma$ -дисперсии свободной воды является частота  $f = 37.7$  ГГц (8-ми мм диапазон радиоволн). Для этой частоты имеется волноводно-элементная база и генерирующие устройства в широком спектре мощностей. Следует отметить, что крайне высокочастотный диапазон (КВЧ) имеет ряд преимуществ перед другими частями сверхвысокочастотного диапазона (СВЧ), одним из которых является существенно меньшие размеры измерительных кювет  $V = 10$  мкл, что позволяет проводить скрининг биологических реагентов различного механизма действия в несколько раз больше в течение 2-3 минут каждый. На рис. 2 представлен аппаратно-регистрирующий комплекс для измерения диэлектрической проницаемости биообъектов волноводным методом с помощью измерительной линии P1-39, и непосредственно блок-схема КВЧ-диэлектрметра.

Конструкция и размеры элементов измерительной кюветы для абсолютных измерений  $\varepsilon$  в статическом режиме, как-то размеры окошек, толщина и материал окошек, высота рабочего объема рассчитаны на основе экспериментальных и расчетных данных, а также результатов математического моделирования на основе строгого решения задачи рассеяния электромагнитных волн [22]. Сигнал поступал с детектора волноводной линии P1-39 на усилитель, с выхода которого через аналого-цифровой преобразователь (АЦП), подавался на персональный компьютер (ПК). В качестве детектора использовался диод 3A123 кристаллическо-планарной структуры с барьером Шоттки. Относительная погрешность

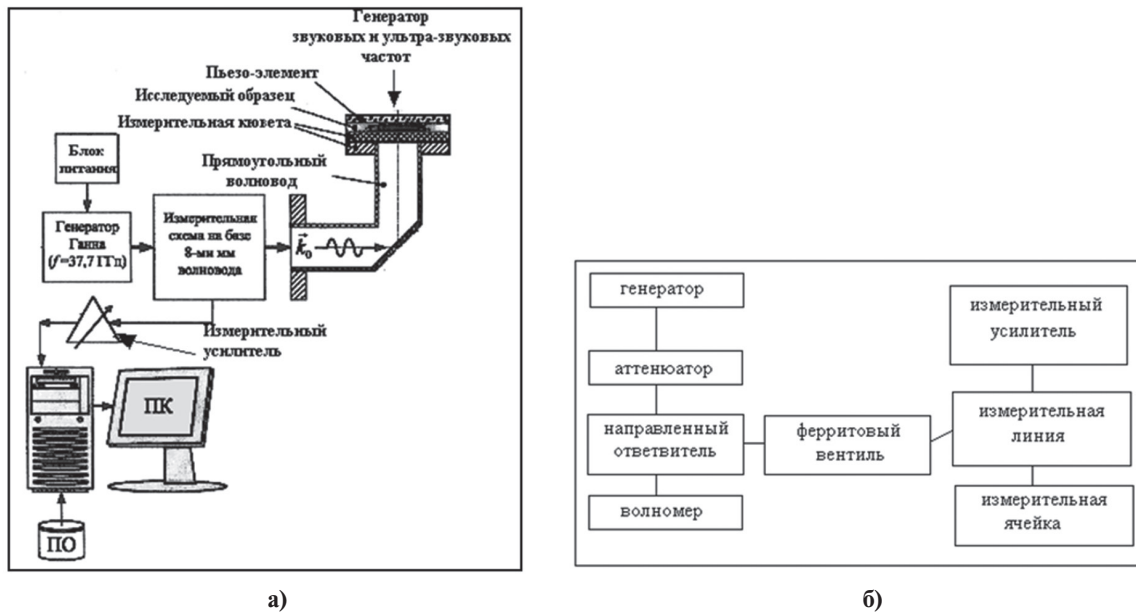


Рис. 2. Аппаратно-регистрающий комплекс для измерений  $\epsilon'$  в «sweep»-режиме акустических частот (а).  
 Блок-схема КВЧ-диэлектromетра для абсолютных измерений  $\epsilon'$  в статическом режиме (б)

по  $\epsilon'$  составила  $\pm 0.7\%$ , абсолютная погрешность по  $\epsilon'$ , после соответствующей обработки с применением программ накопления и фильтрации, составила  $\pm 1.73 \cdot 10^{-12}$  Ф/м. Контроль и дополнительная калибровка производилась по дистиллированной воде.

Акустический «sweep»-режим — это изменение частоты акустических колебаний волноводной пьезо-кюветы по заданному модуляционному закону в соответствии с программой эксперимента. Необходимость применения акустического «sweep»-режима и измерительной кюветы объемом  $V = 167 \pm 5$  мкл была продиктована установлением в измерительной кювете с суспензией эритроцитов стоячих и бегущих волн, чтобы после определения минимума и максимума характеристических частот, перейти к определению диэлектрической проницаемости эритроцитов. Эксперимент был поставлен таким образом, что электромагнитная волна мм-диапазона отражалась от поверхностного слоя суспензии эритроцитов, при этом пьезо-платформа модулировалась акустическими частотами в диапазоне  $f = 10 \div 12000$  Гц. Пьезо-кювета помещалась в раскрыв выхода переходного круглого 8-мм волновода; объем исследуемой суспензии или соответствующих контрольных жидкостей составил  $V = 167 \pm 5$  мкл.

### 1.3. Регистрация электромагнитного сигнала

Во время регистрации электромагнитного отклика от суспензии эритроцитов была использована система временного накопления сигнала в файле при одновременном графическом выводе самого сигнала и его спектра в реальном режиме времени. Обработка полученных данных проводилась с помощью программ накопления электромагнитного сигнала биологической системы эритроцитов из под шумов, анализа оцифрованных данных с последующей обработкой путем применения алгоритма

быстрого преобразования Фурье. Результат одного опыта представлял собой массив данных емкостью от 30 Мб до 80 Мб, который обрабатывался с помощью быстрого Фурье преобразования с функцией фильтра Blackmann-Harris. Максимальное разрешение по акустической частоте при построении частотного анализа не более  $f = \pm 0.07$  Гц при длительности трека не менее 17 сек.

### 1.4. Объекты исследования

Эритроциты являются информативными объектами развития патологии различного генеза, их качественные и количественные характеристики используются как критерии оценки функционального состояния организма, а также сигнальных клеточных систем [23-25]. В данной работе использовали суспензию эритроцитов венозной крови 25 больных ДКМП в возрасте от 30 до 55 лет. Контрольную группу составили интактные образцы крови 13 практически здоровых доноров. Интактные и опытные образцы эритроцитов были получены путем центрифугирования венозной крови в течение 15 минут при 3000 об./мин., затем были стабилизированы 3.8 % раствором цитрата натрия. Трансдукцию клеточного сигнала моделировали в системе «эритроцит-биологическая добавка», в качестве которой использовали водные растворы адреналина и простагландина  $E_2$ . Выбор биологических добавок связан с механизмом действия этих веществ на компоненты аденилатциклазной системы эритроцитов с проявлением эффектов активации и модулирования функции непосредственно адренорецепторов. Постановка эксперимента, обработка и анализ экспериментального материала проводились на базе НИИ терапии им. Л. Т. Малой НАМН Украины. Интерпретация полученных экспериментальных данных основана на том, что процесс взаимодействия биорегуляторов с адренорецепторами

сопровождается увеличением или уменьшением количества свободной воды, что проявляется в изменении диэлектрической проницаемости.

## 2. Результаты и их обсуждение

Воздействуя различными биологическими добавками, была получена информация о функционировании аденилатциклазной системы эритроцитов при ДКМП по изменению диэлектрической проницаемости.

На основе анализа электромагнитного сигнала от суспензии эритроцитов, полученного из 279 сессий измерений, было показано, что для заданных геометрических размеров пьезо-кюветы и объемов исследуемых проб наиболее информативным оказался первый мод в диапазоне акустических частот  $f = 20 \div 65$  Гц.

На рис. 3 показан пример совмещенных треков спектрально-временного поля электромагнитного сигнала от суспензии эритроцитов, помещенной в пьезо-кювету для моделирования и визуализации клеточного ответа интактного образца и опытного образца с добавкой адреналина, активирующей  $\beta$ -адренорецепторы (интактный образец – экспозиция эритроцитов  $t = 0 \div 40$  сек и опытный образец – экспозиция эритроцитов с адреналином ( $t = 40 \div 80$  сек)).

На рис. 4 представлена обработка совмещенных треков спектрально-временного поля суспензии эритроцитов, помещенной в пьезо-кювету (приведенного на рис. 3) для выявления различий сигнала в диапазоне акустических частот ( $f = 20 \div 65$  Гц) при сравнении интактного образца и опытного образца с добавкой адреналина, активирующей аденилатциклазную систему.

В экспериментальных работах широко обсуждается этиология различных форм сердечной недостаточности, в том числе и ДКМП, с точки зрения молекулярной рецепции и нарушений трансдукции

внеклеточных сигналов через аденилатциклазную систему. Доказательством этому является уменьшение количества и плотности адренорецепторов, акцептирующих специфические лиганды на поверхности клеток, что, в свою очередь, сопровождается снижением собственно биохимической возможности аденилатциклазы к  $\beta$ -адренорецепторной стимуляции [26, 27].

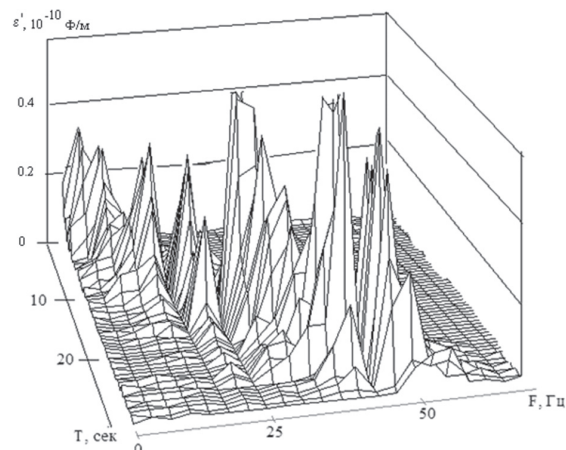


Рис. 4. Обработка совмещенных треков спектрально-временного поля суспензии эритроцитов опытного образца для выявления различий сигнала в диапазоне акустических частот  $f=20 \div 65$  Гц с  $\beta$ -адренергической активацией адреналином по отношению к интактному образцу

По иммунологическим данным [28], у больных ДКМП выявляются антитела к  $\beta_1$ -адренорецепторам и Са-каналам, под влиянием которых также может происходить снижение чувствительности аденилатциклазы. В этиологии ДКМП не исключается активация симпатико-адреналовой системы, результатом которой является возрастание в плазме крови уровня катехоламинов, например, адреналина и норадреналина. В этом случае проявляются механизмы защиты мембраны клеток от чрезмерного действия

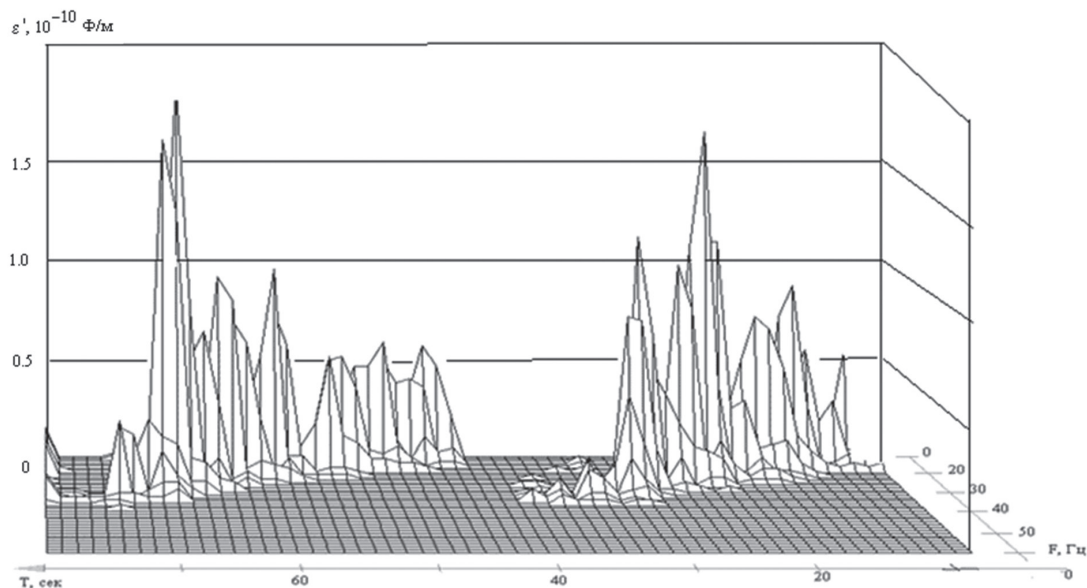
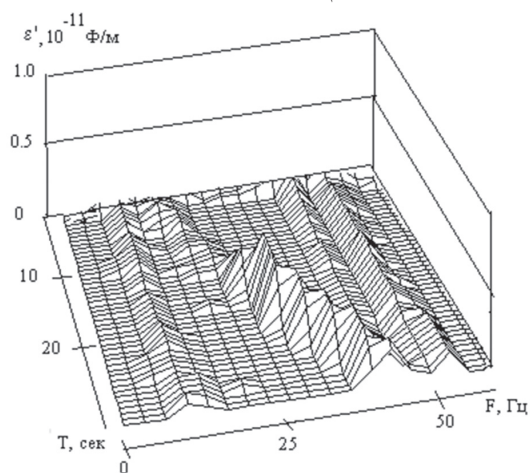


Рис. 3. Совмещенные треки спектрально-временного поля суспензии эритроцитов, помещенной в пьезо-кювету (справа – интактный образец, слева – опытный образец, экспозиция с адреналином)

катехоламинов, что сопровождается конформационными изменениями активных центров адrenoрецепторов с угнетением их молекулярной функции, а также снижением их числа и плотности [29, 30].

В нашей работе выбор модулятора внутриклеточных ответов – простагландина  $E_2$  был не случаен, так как он обеспечивает механизмы нивелирования активности адrenoрецепторов при активации  $\beta$ -адrenoрецепторов мембраны эритроцитов адреналином практически здоровых доноров [31]. Методом микроволновой диэлектromетрии на эритроцитах крови больных ДКМП были обнаружены более выраженные механизмы защиты мембраны клеток простагландином  $E_2$  от действия активатора  $\beta$ -адrenoрецепторов – адреналина. На рис. 5 представлен электромагнитный отклик суспензии эритроцитов с одновременным использованием адреналина и простагландина  $E_2$  при акустическом скрининге пьезо-кюветы в диапазоне акустических частот  $f = 20 \div 65$  Гц.

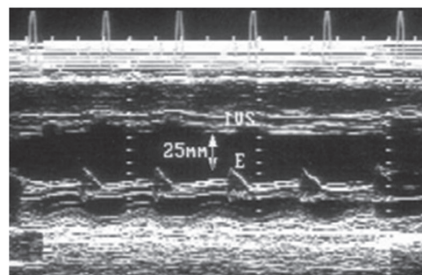
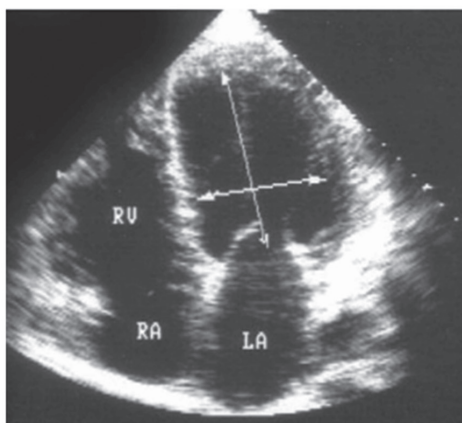


**Рис. 5.** Обработка совмещенных треков спектрально-временного поля суспензии эритроцитов для выявления различий электромагнитного отклика суспензии эритроцитов опытного образца с комбинированной добавкой адреналина и простагландина  $E_2$  в диапазоне акустических частот  $f = 20 \div 65$  Гц по отношению к электромагнитному отклику интактного образца

Результаты обработки клеточного сигнала от эритроцитов, при комбинированном влиянии адреналина и простагландина  $E_2$ , надежно подтверждают гипотезу о модулирующей роли последнего, что проявляется в изменении параметра  $\epsilon'$ . Уменьшение  $\epsilon'$  до  $0.5 \cdot 10^{-11}$  Ф/м объясняет нивелирующее действие простагландина  $E_2$  при активации адреналином увеличением количества связанной воды на мембранных структурах эритроцитов по отношению к интактному образцу.

Параллельно с диэлектрическими исследованиями, методом эхокардиографии регистрировали развитие кардиомегалии. На рис. 6 представлен эхокардиографический М-профиль передне-систолического движения передней створки митрального клапана по направлению к перегородке и уменьшение амплитуды движения створок митрального клапана в диастолу. Как видно из рис. 6, на М-профиле выражена асимметрия и гипертрофия левого желудочка: отношение толщины гипертрофированного участка (перегородка и свободная стенка) к толщине задней стенки в диастолу составило 1:3. Удлинение передней створки митрального клапана отразилось на уменьшении площади поперечного сечения выходного тракта левого желудочка и изменении сократимости задней стенки левого желудочка, что заметно сказалось на дилатации камер сердца и сниженном сокращении миокарда.

Диэлектрические измерения подтвердили появления эхокардиографических признаков дилатации и гипертрофии левого желудочка, при этом отмечали изменения со стороны  $\beta$ -адrenoрецепторного комплекса мембран эритроцитов регистрируемые по  $\epsilon'$ . Данные по микроволновой диэлектromетрии: интактные образцы суспензии эритроцитов практически здоровых доноров  $\epsilon' = 1.67 \cdot 10^{-10} \pm 0.023$  Ф/м (стандартное отклонение по 13 пациентам составило  $1.77 \cdot 10^{-12}$  Ф/м) и опытные образцы суспензии эритроцитов больных ДКМП  $\epsilon' = 1.78 \cdot 10^{-10} \pm 0.027$  Ф/м (стандартное отклонение по 25 пациентам



**Рис. 6.** Двухмерная эхокардиограмма при ДКМП. М-модальное эхокардиографическое исследование на уровне митрального клапана. Стрелками показаны геометрические размеры левого желудочка, RV – правый желудочек, LA – левое предсердие, RA – правое предсердие, IVS – межжелудочковая перегородка. Расстояние от E-пика передней створки митрального клапана до межжелудочковой перегородки 25 мм

составило  $2.07 \cdot 10^{-12}$  Ф/м). При добавлении адреналина у практически здоровых доноров регистрировали  $\epsilon' = 1.49 \cdot 10^{-10} \pm 0.025$  Ф/м (стандартное отклонение по 13 пациентам составило  $2.7 \cdot 10^{-12}$  Ф/м), у больных ДКМП  $\epsilon' = 1.7 \cdot 10^{-10} \pm 0.022$  Ф/м (стандартное отклонение по 25 пациентам составило  $2.4 \cdot 10^{-12}$  Ф/м). Обнаруженная нами зависимость между активностью  $\beta$ -адренорецепторного комплекса и степенью выраженности гипертрофии левого желудочка свидетельствует о том, что состояние цитоплазматического рецепторного аппарата клетки может служить маркером молекулярных изменений во время ремоделирования желудочков.

Дилатационная кардиомиопатия с кардиомегалией также была подтверждена рентгенологическими исследованиями (рис. 7, рис. 8). Как видно из рис. 7 и рис. 8, сердце увеличено в размерах в обе стороны, шаровидной либо треугольной формы, правый атриовазальный угол смещен вверх, левый контур сердечной тени удлинен и выпуклый. Левый кардиодиафрагмальный угол острый либо прямой, выбухание второй дуги по левому контуру за счет расширения выходного отдела правого желудочка. Аорта узкая, гипопластичная, пульсации на ней снижены, снижены также пульсации по контурам сердца. В I косом положении, с контрастированием пищевода, отмечается увеличение левого предсердия 1-3 ст. по дуге большого радиуса. Во II косом положении контур левого желудочка накладывается либо выходит за тень позвоночника.

Прозрачность легочных полей (рис. 8) прогностически крайне неблагоприятный признак, поскольку развивается правожелудочковая недостаточность, застой по большому кругу кровообращения и как результат асцит, анasarка и гибель больного.

Эхокардиография и рентгенографические исследования традиционно используются в диагностических алгоритмах выявления сердечной недостаточности. Усовершенствование систем автоматизированной

компьютерной обработки эхокардиографических изображений способствует уменьшению временных затрат на обнаружение дисфункции миокарда и принятие решения кардиологом. Как показали результаты данной работы, микроволновая диэлектрметрия может дополнить диагностический алгоритм и выявить невидимые для этих методов нарушения в цитоплазматических рецепторных комплексах, проявляющиеся в диэлектрических параметрах на ранних этапах развития сердечной недостаточности. Таким образом, с помощью диэлектрметрии миллиметрового диапазона радиоволн есть возможность распознавать дефекты в молекулярных механизмах реализуемых аденилатциклазной системой. При этом диэлектрическая проницаемость может служить критерием развития патологического состояния в миокарде. Тестирование функции аденилатциклазной системы с использованием стимуляторов и модуляторов адренергической рецепции позволит *in vitro* заметить ранние проявления патологии в условиях неразрушающего контроля.

#### Выводы

Получены данные диэлектрической проницаемости суспензии эритроцитов, на основе которых есть возможность построить алгоритм нарушения системы трансмембранной передачи сигналов через  $\beta$ -адренорецепторный комплекс в кардиомиоцитах при ДКМП. Это позволит объективно оценить степень тяжести заболевания и контролировать эффективность лечебных мероприятий при ДКМП.

Микроволновая диэлектрметрия позволит повысить точность первичной, дифференциальной диагностики сердечной патологии; значительно сократить время обследования больных, является экономически выгодным методом.

Использование результатов исследования позволит решать большое количество задач как теоретической, так и прикладной медицины. Опираясь



Рис. 7. Рентгенологическое исследование ДКМП с кардиомегалией I степени



Рис. 8. Рентгенологическое исследование ДКМП с кардиомегалией II степени

на знання фундаментальних основ механізмів регуляції на молекулярно-клеточному рівні, єсть можливість перейти к прикладним задачам об'єктивізації терапевтичного впливу для індивідуальної корекції терапії, прогнозування обострень і исхода при теченні захворювання.

#### Список літератури:

- [1] *Evstigneev M.P., Shestopalova A.V.* Structure, thermodynamics and energetics of drug-DNA interactions: computer modeling and experiment. In: Application of Computational Techniques in Pharmacy and Medicine; Series: challenges and advances in computational chemistry and physics.— 2014.— Vol. 17.— P. 21–58.
- [2] *Аврунін О.Г.* Принципи комп'ютерного планування функціональних оперативних втручань // Технічна електродинаміка, тем випуск «Силова електроніка та енергоефективність». — 2011. — Ч. 2. — С. 293–298.
- [3] *Аврунін О.Г., Бодяньський Є.В., Калашник М.В., Семенець В.В., Філатов В.О.* Сучасні інтелектуальні технології функціональної медичної діагностики.— Харків: ХНУРЕ, 2018.— 236 с.
- [4] *Образцов И.Ф., Ханін М. А.* Оптимальные биомеханические системы.— М.: Медицина, 1989.— 271 с.
- [5] *Morris A.J., Craig C.* Physiological Regulation of G Protein-Linked Signaling // *Physiological Reviews.*—1999.—Vol. 79.— № 4.— P. 1373–1430.
- [6] *Kobilka B.K., Deupi X.* Conformational complexity of G-protein-coupled receptors // *Trends Pharmacol Sci.*— 2007.— Vol. 28(8).—P. 397–406.
- [7] *Pardo L., Prosser R.S., Mueller L., Kobilka B.K.* Ligand-specific regulation of the extracellular surface of a G protein coupled receptor // *Nature.*— 2010.— Vol. 463.— P.108–112.
- [8] *Takano K., Yamagata Y., Yutani K.* Buried water molecules contribute to the conformational stability a protein // *Protein Eng.*— 2003.— Vol. 16(1).— P.5–9.
- [9] *Zhang L., Yang Y., Kao Y.T., Zhong D.* Protein hydration dynamics and molecular mechanism of coupled water-protein fluctuations // *J.Am.Chem. Soc.*— 2009.— Vol. 131(30).— P.10677–10691.
- [10] *Setny P., Baron R., Kekenes-Huskey P. M., McCammon J. A., Dzubiella J.* Solvent fluctuations in hydrophobic cavity-ligand binding kinetics // *Proc. Natl Acad. Sci. USA.*— 2013.— Vol. 110.—P. 1197–1202.
- [11] *Аксенов С.И.* Вода и ее роль в регуляции биологических процессов.— М.: Наука, 1990.— 118 с.
- [12] *Swenson J., Jansson H., Hedstrom J., R Bergman.* Properties of hydration water and its role in protein dynamics // *J. Phys.: Condens. Matter.*— 2007.— Vol. 19(20).— P.1–9.
- [13] *Щеголева Т. Ю., Колесников В. Г., Васильева Е. В., Васильев Ю. М.* Применение миллиметрового диапазона радиоволн в медицине.— Х.: ХИМБ, 1999.— 233 с.
- [14] *Ebbinghaus S., Kim M., Heyden M., Yu X., Heugen U., Gruebele M., Leitner D. M., Havenith M.* An extended dynamical hydration shell around proteins // *PNAS.*—2007.— Vol. 104, № 52.— P. 20749 – 20752.
- [15] *Masson J., Sauviat M., Martin J., Gallot G.* Ionic contrast terahertz near-field imaging of axonal water fluxes // *PNAS.*— 2006.— Vol. 103, № 13.— P. 4808 – 4812.
- [16] *Mahon N.G., Murphy R.T., MacRae C. A., Caforio A.L., Elliott P.M., McKenna W.J.* Echocardiographic evaluation in asymptomatic relatives of patients with dilated cardiomyopathy reveals preclinical disease // *Annals of Internal Medicine.*—2005.— Vol. 143(2).— P. 108 – 115.
- [17] *Reichart D., Magnussen C., Zeller T., Blankenberg S.* Dilated cardiomyopathy: from epidemiologic to genetic phenotypes// *Journal of internal medicine.*— 2019.—Vol. 286, Issue 4.— P. 362 – 372.
- [18] *Барт Б.Я., Беневская В.Ф.* Дилатационная кардиомиопатия: клиника, диагностика и лечение // *Лечебное дело.*— 2005.— №1.— С. 3 – 9.
- [19] *Свиридова Е.В., Щеголева Т.Ю., Бахова Л.К., Васильев Ю.М.* Молекулярно-клеточные аспекты прогнозирования течения острого инфаркта миокарда // *Кардиология.*— 1993.— № 11.— С. 58 – 60.
- [20] *Ахадов Я. Ю.* Диэлектрические свойства чистых жидкостей.— М.: Издательство стандартов, 1972.— 412 с.
- [21] *Древаль Н. В.* Применение миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн и их комбинации в исследовании биологических объектов // дис...канд. биол. наук: 03.00.02 / Древаль Наталия Владимировна.- Симферополь, 2009.— 163 с.
- [22] *Щеголева Т. Ю.* Исследование диэлектрических характеристик биообъектов в миллиметровом диапазоне радиоволн.— Киев: Наукова думка, 1996.— 187 с.
- [23] *Солошенко Э.Н., Кондакова А.К., Колесников В.Г., Хмель Н.В., Шевченко З.М., Ярмак Т.П.* Оценка диэлектрической проницаемости эритроцитов при выявлении сенсификации к анестезирующему средству артифрину с помощью метода КВЧ-диэлектрометрии // *Дерматология и венерология.*— 2013.— № 3 (61).— С. 32 – 37.
- [24] *Солошенко Э.Н., Дунаева А.Е., Мамотюк Е.М.* Морфометрические показатели эритроцитов и функциональное состояние их мембран у больных лекарственной болезнью // *Експериментальна клінічна медицина.*— 2001.— №3.— С. 67 – 72.
- [25] *Chetverykov G., Tereshchenko G., Konarieva I.* Detection of blood cells // *Бионика интеллекта.*— 2019.— № 1(92).— P. 26 – 30.
- [26] *Моисеев В.С., Киякбаев Г. К.* Кардиомиопатии и миокардиты.— М.: ГЭОТАР-Медиа, 2012.— 352 с.
- [27] *Терещенко В.П., Амосова Е.Н.* О морфогенезе дилатационной кардиомиопатии // *Мед. архив.*— 1987.—№.7.— С.25 –26.
- [28] *Рябенко Д.В.* Дилатационная кардиомиопатия // *Укр. кард. журн.*— 1998.—№.1.— С.70 – 76.
- [29] *Ribuer H.S., Plucikski D.A.* Adrenergic receptor // *Amer. J. Cardiol.*— 1985.— Vol.56.— P. 896 – 904.
- [30] *Куренная Г.С., Чекнёва Е.Е., Ткачук В.А.* -адренергический рецептор и аденилатциклаза // *Бюл. эксперим. биол. и мед.*— 1987.— Том 104, №11.— С.590 – 594.
- [31] *Коноплева Л.Ф., Кошевский Ю.И.* Современные взгляды на патогенез и лечение больных с дилатационной кардиомиопатией // *Укр. кардиологический журнал.*— 1997.— №.5-6.— С.110 –115.

Поступила в редколлегию 02.06.2020

УДК 004.41

DOI 10.30837/bi.2020.1(94).15



О.В. Зарицький<sup>1</sup>, О.Б. Костенко<sup>2</sup>, М.В. Булаєнко<sup>3</sup>, В.П. Манаков<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Аспірант кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій,  
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова,  
sazcheg@ukr.net; ORCID 0000-0003-0790-8399

<sup>2</sup> Кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій,  
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова,  
ks42@ukr.net; ORCID 0000-0001-9744-4377

<sup>3</sup> Кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій,  
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова,  
mbulaenko@gmail.com; ORCID 0000-0002-1503-7450

<sup>4</sup> Кандидат технічних наук, професор кафедри медіасистем та технологій,  
Харківський національний університет радіоелектроніки,  
volodymyr.manakov@nure.ua; ORCID 0000-0002-7410-5409

## МАРКУВАННЯ ПРОПУЩЕНОЇ ПРОСТОРОВО-РОЗПОДІЛЕНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ ВАЛІДАЦІЇ

Мета роботи полягає в дослідженні просторово-розподіленого набору даних, маркуванні розбіжностей та помилок за допомогою методу валідації. Валідація дозволяє прискорити перевірку даних та підвищує якість обробки великих масивів просторово-розподіленої інформації. Наведений підхід дозволяє перевіряти і послідовно фіксувати результати, які відповідають встановленим критеріям. Розглянуто моделі, які призначені для конвертування диференційованих наборів просторово-розподілених даних у простір єдиного цифрового опису. Результат перевірки запропоновано подавати у звітній формі.

ПРОСТОРОВО-РОЗПОДІЛЕНА СИСТЕМА, ПРОСТОРОВО-РОЗПОДІЛЕНА ІНФОРМАЦІЯ, БАЗА ТОПОГРАФІЧНИХ ДАНИХ, ЕКЗЕМПЛЯР КЛАСУ, ВАЛІДАЦІЯ, ЗВІТ, МАРКУВАННЯ ПРОПУЩЕНИХ ДАНИХ.

The purpose of the study is to investigate the spatially distributed data set, to identify differences and errors using the validation method. Validation accelerates data validation and improves the processing of large volumes of spatially distributed information. The above approach allows to check and consistently record the results that meet the established criteria. Models designed to convert differentiated spatially distributed data sets into a single digital description space are considered. The result of the audit is proposed to be reported.

SPATIALLY DISTRIBUTED SYSTEM, SPATIALLY DISTRIBUTED INFORMATION, TOPOGRAPHIC DATABASE, CLASS COPY, VALIDATION, REPORT, MISSING DATA MARKING.

Цель работы заключается в исследовании пространственно-распределенного набора данных, маркировке расхождений и ошибок с помощью метода валидации. Валидация позволяет ускорить проверку данных и повышает качество обработки больших массивов пространственно-распределенной информации. Приведенный подход позволяет проверять и последовательно фиксировать результаты, которые соответствуют установленным критериям. Рассмотрены модели, которые предназначены для конвертирования дифференцированных наборов пространственно-распределенных данных в пространство единого цифрового описания. Результат проверки предложено подавать в отчетной форме.

ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СИСТЕМА, ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ИНФОРМАЦИЯ, БАЗА ТОПОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ, ЭКЗЕМПЛЯР КЛАССА, ВАЛИДАЦИЯ, ОТЧЕТ, МАРКИРОВКА ПРОПУЩЕННЫХ ДАННЫХ.

### Вступ

В результаті прийняття нової концепції Національної інфраструктури геопросторових даних України (НІГД) [1] для всіх суб'єктів сфери використання планування територій стала необхідним організація відповідних баз просторово-розподілених даних (БПРД). Таким чином вже на місцевих рівнях почали затверджуватися нові структури класифікатора, які орієнтовані на уніфікацію і однозначність створення просторових об'єктів для всіх підприємств, як модераторів просторово-розподіленої інформації (ПРІ) в Україні.

Починаючи з 2013 року активізувалася робота щодо стандартизованої цифрової форми подання базових наборів ПРІ [2]. На цей час сформовані значні архіви інформації, які кількісно та якісно диференційовані. Такі обставини сьогодні ускладнюють перехід підприємств та установ до нових стандартів роботи [3]. Разом з тим і надалі залишається економічно вигідним використовувати існуючу архівну інформацію, навіть якщо вона створювалася на ранніх етапах без єдиних методологічних вимог.

Щоб дані матеріалів минулих років мали нормативну прийнятність для подальшого аналізу і

обробки, необхідно розробляти моделі конвертування на основі валідації. Такі моделі призначені для конвертування диференційованих наборів ПРІ у простір єдиного цифрового опису. Іншими словами набори даних мають проходити перевірку на адекватність.

Необхідно впроваджувати системи перевірки відомостей в БПРД як під час конвертування архівів до оновлених стандартів, так і після їх перетворення. Тобто, необхідні підходи, які б дозволили фахівцям сфери використання та планування територій маркувати пропущені дані в великих масивах ПРІ. Перевірка різних наборів даних на правильність має формувати свої критерії згідно множини регламентованих правил (МРП) і виводити результат у документ текстового формату.

### 1. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Валідація – процедура, що дає високий ступінь впевненості у тому, що конкретний процес, метод або система буде послідовно приводити до результатів, які відповідають заздалегідь встановленим критеріям прийнятності. Процес валідації актуальний і застосовується в широкому спектрі і в різних видах діяльності [4].

Для оцінки вагомості масивів даних щодо продуктів рослинного покриву [5] також використовують валідаційні процеси. Валідація допомагає формувати чітку структуру стратифікації (розшарування пластів породи) при врахуванні факторів кліматичної та рослинної класифікації.

В останні роки зростання величезних транзакційних і експериментальних наборів даних разом з вимогами до інтелектуального аналізу цих даних створили потреби в алгоритмах кластеризації, які масштабуються і можуть застосовуватися в різних областях. У дослідженні [6] наголошується, що валідація на основі кластерного аналізу концептуально може виявляти групи схожих об'єктів та розподіляти шаблони і кореляційні особливості у великих наборах даних.

У статті [7] вказано, що валідація є необхідним кроком для прийняття моделей, які працюють з наборами даних. Для оцінки ефективності моделей впроваджується показник відповідності між даними, що спостерігаються та даними, що моделюються.

За матеріалами дослідження [8] валідація застосовується при переносі баз даних. Перевірка великих і складних масивів даних стосується не самого їх змісту, а всієї схеми даних. З метою зменшення ресурсних витрат, процес перевірки пропонується проводити тільки за кількістю рядків даних, що мігрують між двома базами.

У роботі [9] процес валідації використовується для виявлення та виправлення помилок у файловій

системі. Додаток, що розглядається в цьому дослідженні, перевіряє та виявляє помилки серед параметрів системи і зберігає результати перевірки у файлах формату CSV.

Методи перевірки відіграють важливу роль у виявленні можливих помилок або невідповідностей. Так у літературі [10] валідацію з відповідним критерієм вимог розглядають як гетерогенний процес, заснований на застосуванні різних незалежних методів.

Зважаючи на представлений аналітичний огляд, можна наголосити на очевидних перевагах методу валідації в інформаційну епоху. Для того, щоб просторово-розподілені системи (ПРС) були життєздатними, масиви даних, які в них використовуються, потребують належної перевірки.

### 2. Мета та задачі дослідження

Представлене дослідження стосується порівняльних алгоритмів перевірки результатів конвертування баз даних з ПРІ для забезпечення її достовірності. У роботі стоять такі завдання:

- провести аналіз експериментального набору бази просторово-розподілених даних (БПРД);
- сформувати ряд правил перевірки;
- реалізувати процес валідації та отримати результат перевірки у звітній формі в якості маркувань пропущеної просторово-розподіленої інформації (ПРІ) в базах даних.

### 3. Матеріали та методи досліджень

Існує багато моделей, які направлені на обробку ПРІ. Якщо виникає питання перевірки змісту інформації на адекватність (як в нашому випадку), тоді застосовують такий метод, як валідація. Результати методу валідації можуть бути використані для оцінки якості, надійності і послідовності аналітичних результатів.

Оскільки валідація використовується в різних сферах, то її застосовують в залежності від обмежень даних для перевірки.

1. Посимвольна перевірка. Така перевірка виконується в наданому для користувача інтерфейсі і може слугувати, як лексичний аналіз компілятора для виявлення недопустимих символів, тому її ще називають «лексичною».

2. Перевірка окремих значень. Дана перевірка встановлюється в окремому полі та виконується під час введення даних і після завершення введення, коли поле втрачає фокус. Такі перевірки по аналогії з компіляторною термінологією називають «синтаксичними».

3. Сукупність вхідних значень. Перевірка відбувається після того, як програма отримала дані. Під час такої валідації можна виконати так звані «семантичні» перевірки, націлені не тільки на окремі значення, а і на взаємозв'язки між ними.

4. Перевірка стану системи після обробки даних. Даний спосіб застосовують, коли перевірку вхідних даних не вдається виконати, тобто дані обробляють з можливістю повернути все до початкового стану. Таку перевірку часто називають «транзакційною».

Отже, результат валідації – доказ того, що процес працює, як повинен. Представлений вище четвертий спосіб застосування цілком підпадає під завдання цього дослідження.

Близьким за значенням до валідації є термін «верифікація». Верифікація – доказ того, що вірогідний факт або твердження є істинним. Іншими словами верифікація – це просто перевірка, а валідація – перевірка з наданням законної сили.

База топографічних даних (БТД) – сукупність взаємопов'язаних ПРІ, керування якою здійснюється централізовано [11]. БТД може представляти відомості ПРС, які взаємодіють між собою та оперують інформацією про різні просторові об'єкти.

Постановою [12] визначено механізм обміну інформацією між ПРС сфери використання та планування територій, а також перелік ПРІ, обмін якими може здійснюватися у процесі такої взаємодії. Це спрямовано на досягнення наступних цілей:

- формування єдиної картографічної основи для ПРС;
- гарантування взаємного поповнення ПРІ;
- гарантування обов'язковості передачі ПРІ, гарантування об'єктивності, достовірності та повноти ПРІ;
- запобігання дублюванню робіт з інформаційного наповнення ПРС;
- уніфікацію ПРС;
- надання фахівцями та користувачами актуальних ПРІ.

Просторові набори даних сфери використання та планування територій у дослідженні представлені як елементи концепції динамічної ПРС (ДПРС) [13]. Дані, що використовуються, стосуються окремого житлового кварталу населеного пункту Котляри Харківського району Харківської області. Фрагмент БПРД ДПРС експериментального об'єкту представлено на рис. 1.

Структуру експериментального набору ПРС та їх класів, які стосуються ДПРС представлено на рис. 2. Дані БПРД є різними, диференційованими, зібраними за різними правилами, що згідно концепції НІГД є неприйнятним, оскільки база даних повинна представляти однозначну інформацію.

Вхідні дані для перевірки надходять з БТД. Кожен об'єкт з БТД має свою особливість та стан. Стан об'єкта представлений набором значень його атрибутів. Множина об'єктів з однаковим набором атрибутів і особливостей утворюють клас. Кожному класу відповідає його просторовий тип, що описує структуру класу. Екземпляр є аналогом просторового об'єкту та представником відповідного класу.

На рис. 3 наведено класи які перевіряються розробленими в дослідженні алгоритмами. Вихідними даними має бути результат перевірки конвертування БТД у вигляді звіту, що надається в табличній формі. Після чого результат записується в текстовий документ і маркує об'єкти, які не відповідають заздалегідь встановленим критеріям МРП.

При моделюванні концептуальної схеми алгоритмів перевірки БТД були сформовані чотири групи правил: синтаксису, топології, актуальності, семантичної відповідності.

Правило синтаксису – перевірка наявності в атрибутах синтаксичних помилок, які відхиляються від загальноприйнятих правил правопису.



Рис. 1. Композиція векторного та растрового відображень житлового кварталу населеного пункту

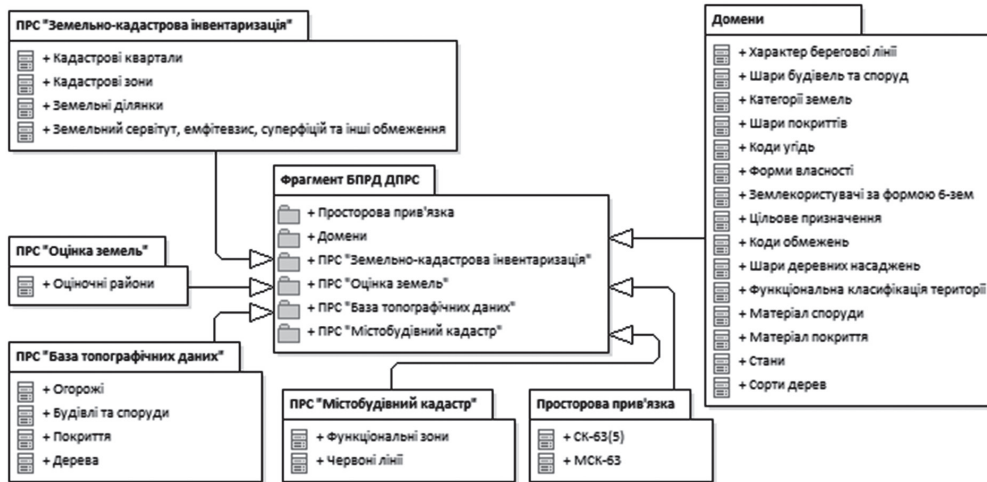


Рис. 2. UML-діаграма пакетної асоціації ПРС та класів з БПРД ДПРС

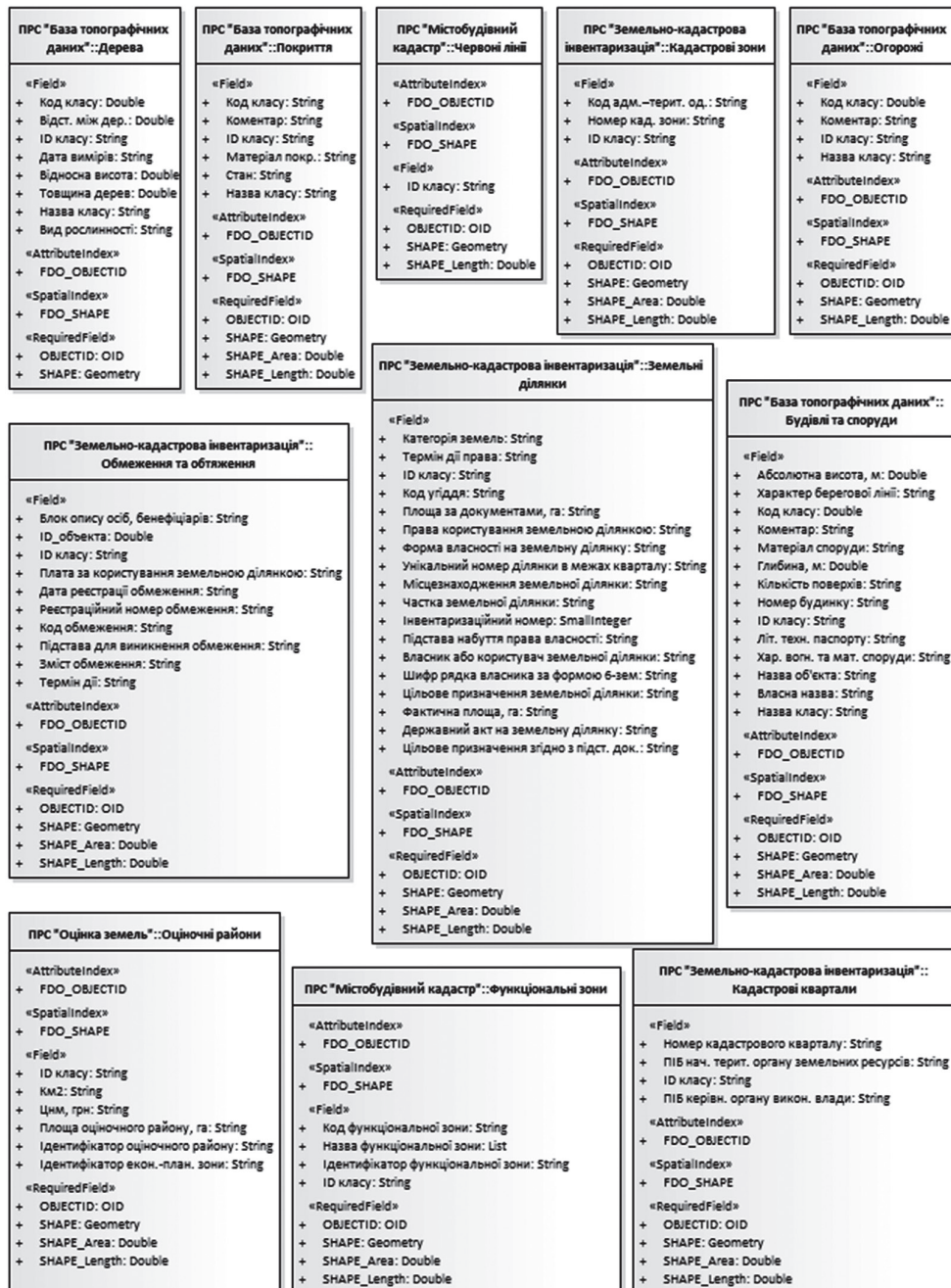


Рис. 3. UML-діаграма класів експериментального набору ПРІ

Правило топології — перевірка взаємоперетинів, накладань, розривів, входжень/невходжень ПРІ між собою.

Правило актуальності — порівняння часових інтервалів згідно періодичності оновлення ПРІ.

Правило семантики — перевірка відповідності показників відносно діючої МРП.

Згідно визначених правил перевірки створені блок-схеми алгоритмів перевірки ПРІ. В процесі роботи алгоритму відбувається наступне, а саме:

- формування заголовку звіту (рис. 4);
- маркування об’єктів за правилом синтаксису (невідповідність значення вказаному розміру поля, повторюваність текстового символу, вміст поза діапазоном допустимих значень);
- маркування об’єктів за правилом семантики (самовільно зайняті землі, дані, що перевищують нормативні показники за цільовим використанням земельних ділянок, нецільове використання, перевищенням граничного параметру) (рис. 4);
- маркування об’єктів за правилом актуальності (застарілі дані);

- маркування об’єктів за правилом топології (перетин ділянок червоними лініями) (рис. 5);
- формування статистичних даних (рис. 5).

#### 4. Обговорення результатів дослідження

Для реалізації перевірки масиву даних було використане програмне забезпечення «Digitals» [14]. Програма надає широкі можливості для написання різних видів скрипт-додатків для полегшення роботи з масивами ПРІ, а також є зручною для створення/редагування/перегляду цифрових, топографічних карт.

Згідно з визначеними групами правил (систаксису, топології, актуальності, семантики) розроблені наступні критерії перевірки БПРД:

- дані застарілі;
- перевищені нормативні показники;
- самовільно зайняті землі;
- порушені містобудівні умови.

В результаті роботи запропонованого алгоритму валідації БПРД формується звіт про пропущені дані в екземплярах класів експериментального об’єкту. Звіт про виконання перевірки даних наведено на рис. 6.

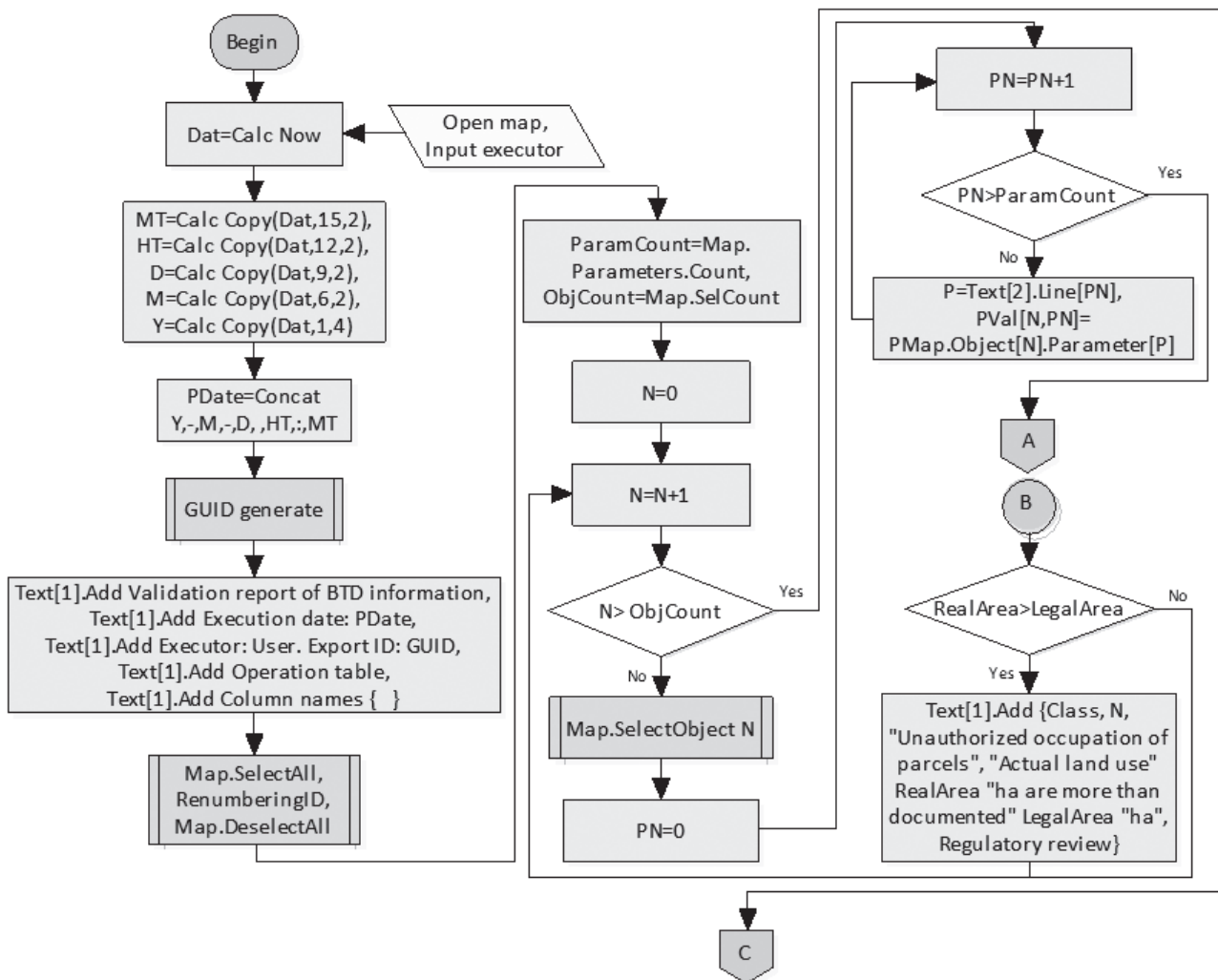


Рис. 4. Фрагмент блок-схеми алгоритму валідації даних: формування заголовку звіту та маркування самовільно зайнятих земель

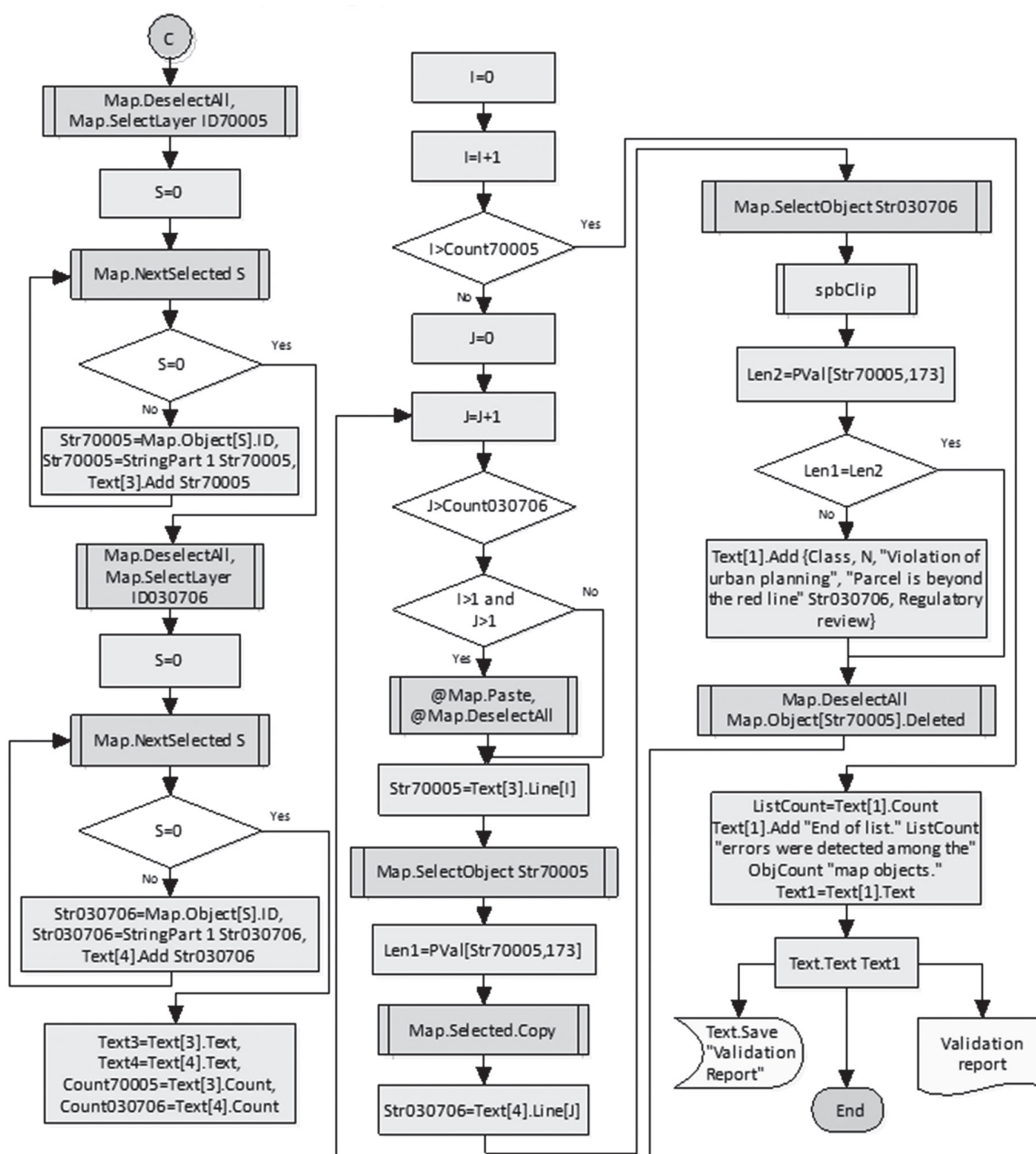


Рис. 5. Фрагмент блок-схеми алгоритму валідації даних: маркування ділянок, що перетинаються обмежувальними лініями забудови та формування підвалу звіту

### Висновки

В роботі розглянуто наявні аналоги процесу валідації. Сформульовано концептуальну модель процесу валідації на основі розроблених правил. Кожне правило відповідає реалізації певної МРП.

Наведено схему та структуру БПРД на прикладі БТД, що показує, з яких ПРС використовувалися дані для перевірки.

В дослідженні описані атрибути, класи та ПРС, що є вхідними даними для експериментального об'єкту.

Представлений сценарій перевірки БПРД дозволяє маркувати помилки в складових ПРС та формувати звітний документ.

Запропоновані в дослідженні механізми та інструменти побудови алгоритмічної моделі можуть

бути застосовані для подальшої програмної реалізації ДПРС. Таким чином маркування пропущеної інформації в БПРД дозволяє значно скоротити час опрацювання архівів інформації та результатів їх конвертування.

### Список літератури:

- [1] Про національну інфраструктуру геопросторових даних: Проект Закону від 23.01.2018 № 7523. База даних «Законопроекти України». КМ України. URL: [http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4\\_1?pf3511=63373](http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=63373) (дата звернення: 21.02.2019).
- [2] Стандарти [Електронний ресурс] // Науково-дослідний інститут геодезії і картографії. URL: <https://gki.com.ua/ua/tehnichni-komitet-103>.
- [3] Булаєнко М.В., Костенко О.Б., Зарицький О.В. Автоматизація конвертування просторових об'єктів до стандартів оновлених класифікаторів. / Математичні моделі та новітні технології управління економічними та технічними системами: колек-

Звіт про виконання перевірки відомостей у БТД за результатами конвертування				
Дата виконання: 2019-12-20 17:42.				
Виконавець: Sazcheg ID експорту: 44133-8-0-8.				
Таблиця проведення операції				
Назва шару	Код об'єкта	Зміст помилки	Предмет помилки	Примітка, підстава, нормативне посилання
Шар 10000050 "Межа земельної ділянки"	19	Перевищення нормативного показника	Земельна ділянка забудована на 55 відсотків, що перевищує максимальні 50 відсотків	ДБН Б.2.2-12:2018 Планування і забудова територій. Зона садибної забудови. Таблиця 6.2 "Показники граничних параметрів забудови земельної ділянки". З поверхи без урахування мансарди - не більше 50 відсотків.
Шар 10000050 "Межа земельної ділянки"	20	Перевищення нормативного показника	Площа землекористування 0.1900 га за цільовим призначенням код-07.03 є більшою за допустиму 0.1000 га	Земельний кодекс України. Стаття 121. Норми безоплатної передачі земельних ділянок громадянам: г) для індивідуального дачного будівництва - не більше 0,10 гектара. Код КВЦПЗ 07.03 - Для індивідуального дачного будівництва.
Шар 10000050 "Межа земельної ділянки"	20	Самовільно зайняті землі	Фактична площа землекористування 0.1998 га є більшою за оформлені 0.1900 га	Земельний кодекс України. Стаття 211. 1. Громадяни та юридичні особи несуть цивільну, адміністративну або кримінальну відповідальність відповідно до законодавства за такі порушення: б) самовільне зайняття земельних ділянок.
Шар 6100 "Дерева"	30	Дані застарілі	Дата вимірів 25.01.2014, крайня дата актуальності 20.12.2014 рік	Постанова "Про затвердження Порядку загальнодержавного топографічного і тематичного картографування", п. 11. Періодичність оновлення ортофотокарт (фотокарт) становить не більш як п'ять років.
Шар 6100 "Дерева"	32	Дані застарілі	Дата вимірів 25.01.2014, крайня дата актуальності 20.12.2014 рік	Постанова "Про затвердження Порядку загальнодержавного топографічного і тематичного картографування", п. 11. Періодичність оновлення ортофотокарт (фотокарт) становить не більш як п'ять років.
...	...	...	...	...
<b>Кінець списку. Серед 102 об'єктів набору даних виявлено 56 помилок.</b>				

Рис. 6. Звіт додатку валідації з маркуванням пропущеної інформації в БПРД

- тивна монографія // Харків: ФОП Панов А.М., 2018. — 314 с. (С. 295-301).
- [4] Валідація [Електронний ресурс] // URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D1%96%D0%BA%D1%96%D0%BF%D0%B5%D0%B4%D1%96%D1%8F>.
- [5] Olofsson P. et al. A global land-cover validation data set, part I: Fundamental design principles // International Journal of Remote Sensing. 2012. № 33(18). С. 5768-5788. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431161.2012.674230>.
- [6] Halkidi M., Batistakis Y., Vazirgiannis M. On clustering validation techniques // Journal of intelligent information systems. 2001. № 17(2-3). С. 107-145. URL: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1012801612483>.
- [7] Mayer D. G., Butler D. G. Statistical validation // Ecological modelling. 1993. Т. 68. № 68(1-2). С. 21-32. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0304380093901052>.
- [8] Нефедова И. В. Тестирование кода при переносе базы данных // Системные технологии. 2016. № 20. С. 96-100. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/testirovanie-koda-pri-perenose-bazy-dannyh>.
- [9] Abba A. H., Hassan M. Design and Implementation of a CSV Validation System // Proceedings of the 3rd International Conference on Applications in Information Technology. ACM, 2018. С. 111-116. URL: <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=3274879>.
- [10] Maalem S., Zarour N. Challenge of validation in requirements engineering // Journal of Innovation in Digital Ecosystems. 2016. № 3(1). С. 15-21. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352664516300025>.
- [11] СОУ 742-33739540 0010:200. Комплекс стандартів. База топографічних даних : Загальні вимоги". [Чинний від 2007-XX-XX]. Вид. офіц. Київ : Мінприроди України, 2010. 27 с. URL: <https://gki.com.ua/files/site.ndigk/document/standarts/ukrdez/5450d9d0-2716-11ea-a9ca-cfb530425d05.pdf> (дата звернення: 04.02.2019).
- [12] Про затвердження Порядку інформаційної взаємодії між кадастрами та інформаційними системами : Постанова від 03.06.2013 № 483. База даних «Законодавство України». КМ України. Дата оновлення: 17.03.2017. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/483-2013-%D0%BF> (дата звернення: 04.02.2019).
- [13] Боровий В. О., Зарицький О. В. Технологія побудови динамічної геоінформаційної системи зонінгу // Новітні технології. 2018. № (1). С. 119-128. DOI: 10.31180/2524-0102/2018.1.05.14.
- [14] Приложение D «Digitals book». Введение в Digitals Script [Електронний ресурс] // Digitals. Использование в геодезии, картографии и землеустройстве / Д. В. Федоров. URL: <http://www.vinmap.net/book/apd.html> (дата звернення: 12.04.2018 р.).

Надійшла до редакції 19.02.2020