

ISSN 3083-6573 Print  
ISSN 3083-6581 Online

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ

# IT&S INFORMATION TECHNOLOGIES SYSTEMS

5<sup>(5)</sup>  
2025

## TOPICS

- LONG-TERM OBJECT TRACKING IN VIDEO
- MULTI-CRITERIA COMPONENT SELECTION
- TRANSFORMATION MODEL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT EDUCATION

**Editor-in-Chief:** O.M. KHIMICH, (Kyiv, Ukraine)

**Deputies Editor-in-Chief:** O.Ye. VOLKOV, (Kyiv, Ukraine),  
Ye.A. SAVCHENKO-SYNIKOVA, (Kyiv, Ukraine)

**Editorial Board:** Ali Abbasov Mammad oglu (Baku, Azerbaijan); O.Yu. Azarkhov (Dnipro, Ukraine); I.Ye. Andrushchak (Lutsk, Ukraine); A.V. Anisimov (Kyiv, Ukraine); I. Vlahavas (Thessaloniki, Greece); W. Wojcik (Lublin, Poland); D.O. Volosheniuk (Kyiv, Ukraine); A.M. Hlibovets (Kyiv, Ukraine), O. Gorbunovs (Riga, Latvia); V.F. Gubarev (Kyiv, Ukraine); L.F. Gulyanytskyi (Kyiv, Ukraine); A.M. Gupal (Kyiv, Ukraine); V.V. Zosimov (Odesa, Ukraine); P.I. Kohut (Dnipro, Ukraine); L.M. Kozak (Kyiv, Ukraine); S.L. Kryvyu (Kyiv, Ukraine); V.I. Lytvynenko (Kherson, Ukraine); R. Martínez Béjar (Murcia, Spain); O.V. Palagin (Kyiv, Ukraine); S.L. Pogorilyu (Kyiv, Ukraine); N. Prokofyeva (Riga, Latvia); B. Savchynskyy (Heidelberg, Germany); A.-B. M. Salem (Cairo, Egypt); K.M. Synytsa (Kyiv, Ukraine); V.S. Stepashko (Kyiv, Ukraine); I.V. Surovtsev (Kyiv, Ukraine); L.S. Fainzilberg (Kyiv, Ukraine); A.O. Chykriy (Kyiv, Ukraine); M.I. Schlesinger (Kyiv, Ukraine)

**Responsible Executor:** H.O. Pezentsali

**Editors:** N.A. Charchiyan, A.Yu. Vitchenko, O.O. Lysenko

**Computer Group:** O.V. Tupalskiy, N.S. Stashkova

Media ID R30-05899

**Editorial address:** Institute of Information Technologies and Systems  
of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
40, Hlushkova Akd. ave., Kyiv, 03187

phone: +380 (44) 526-00-09, e-mail: its.journal.ua@gmail.com,

<https://nasu-periodicals.org.ua/index.php/its>

**Головний редактор:** О.М. ХІМІЧ (Київ, Україна)

**Заступники головного редактора:** О.Є. ВОЛКОВ (Київ, Україна),  
Є.А. САВЧЕНКО-СИНЯКОВА (Київ, Україна)

**Редакційна колегія:** Алі Аббасов Маммед огли (Баку, Азербайджан); О.Ю. Азархов (Дніпро, Україна); І.Є. Андрушак (Луцьк, Україна); А.В. Анісімов (Київ, Україна); І. Влахавас (Салоніки, Греція); В. Войчик (Люблін, Польща); Д.О. Волошенко (Київ, Україна); А.М. Глібовець (Київ, Україна); О. Горбуновс (Рига, Латвія); В.Ф. Губарев (Київ, Україна); Л.Ф. Гуляницький (Київ, Україна); А.М. Гупал (Київ, Україна); В.В. Зосімов (Одеса, Україна); П.І. Когут (Дніпро, Україна); Л.М. Козак (Київ, Україна); С.Л. Кривий (Київ, Україна); В.І. Литвиненко (Херсон, Україна); Р. Мартінес Бежар (Мурсія, Іспанія); О.В. Палагін (Київ, Україна); С.Л. Погорілий (Київ, Україна); Н. Прокоф'єва (Рига, Латвія); Б. Савчинський (Гейдельберг, Німеччина); А.-Б. М. Салем (Каїр, Єгипет); К.М. Синиця (Київ, Україна); В.С. Степашко (Київ, Україна); І.В. Суворцев (Київ, Україна); Л.С. Файнзільберг (Київ, Україна); А.О. Чикрій (Київ, Україна); М.І. Шлезінгер (Київ, Україна)

**Відповідальний виконавець:** Г.О. Пезенцалі

**Редактори:** Н.А. Чарчян, А.Ю. Вітченко, О.О. Лисенко

**Комп'ютерна група:** О.В. Тупальський, Н.С. Шашкова

Ідентифікатор медіа: R30-05899

**Адреса:** Інститут інформаційних технологій та систем НАН України, м. Київ,  
Просп. Акад. Глушкова, 40, 03187

Телефон: 526-00-09, e-mail: its.journal.ua@gmail.com,

Сайт: <https://nasu-periodicals.org.ua/index.php/its/>

Підп. до друку 00.12.2025 р. Формат 70 × 108/16. Гарн. Book Antiqua.

Ум. друк. арк. 00,00. Обл.-вид. арк. 00,00. Тираж 000 пр. Зам. № 0000

Видавець і виготовлювач ВД «Академперіодика» НАН України  
01024, Київ, вул. Терещенківська, 4

Свідцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів  
видавничої справи серії ДК № 544 від 27.07.2001



## CONTENTS

### **Theory of Information Technologies and Systems Construction**

*Tymofijeva N.K., Pavlenko N.Ye.* Some Approaches to Addressing Uncertainty on Digital Platforms ..... 3

### **Computer Vision and Pattern Recognition**

*Kyyko V.M.* Determining The Scale and Rotation Angle for Long-Term Object Tracking in Video ..... 22

### **Intellectual Informational Technologies**

*Sytnyk M.V., Pidnebesna H.A.* Optimization of Multi-Criteria Selection of Computer Components Based on Hierarchy Analysis ..... 39

### **Digital Medicine**

*Kiforenko S.I., Belov V.M., Lavreniuk M.V., Hontar T.M., Kozlovska V.O.* Methodological Aspects of Interoperability in Applied Tasks of Health Assessment and Support ..... 51

### **Digital Technologies in Learning**

*Kudriavtseva S.P., Volkov O.Ye., Synytsya K.M., Savchenko-Syniakova Ye.A.* Digital Transformation Model for Sustainable Development Education ..... 66

**Author Guidelines** ..... 83

## ЗМІСТ

### **Теорія побудови інформаційних технологій та системи**

*Тимофієва Н.К., Павленко Н.Є.* Деякі підходи до вирішення проблеми невизначеності на цифрових платформах ..... 3

### **Комп'ютерний зір та розпізнавання образів**

*Кийко В.М.* Визначення масштабу та кута повороту для довгострокового відстеження об'єкта у відео ..... 22

### **Інтелектуальні інформаційні технології**

*Sytnyk M.V., Pidnebesna H.A.* Optimization of Multi-Criteria Selection of Computer Components Based on Hierarchy Analysis ..... 39

### **Цифрова медицина**

*Кіфоренко С.І., Белов В.М., Лавренюк М.В., Гонтар Т.М., Козловська В.О.* Методологічні аспекти інтеоперабельності в прикладних задачах оцінювання та підтримки здоров'я ..... 51

### **Цифрові технології в навчанні**

*Kudriavtseva S.P., Volkov O.Ye., Synytsya K.M., Savchenko-Syniakova Ye.A.* Digital Transformation Model for Sustainable Development Education ..... 66

**Керівництво для авторів** ..... 83

---

# THEORY OF INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS CONSTRUCTION

## ТЕОРІЯ ПОБУДОВИ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА СИСТЕМ

<https://doi.org/10.15407/intechsys.2025.05.003>  
УДК 519.816

**Н.К. ТИМОФІЄВА**, д-р техн. наук, старш. наук. співроб., завідувач відділом,  
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,  
просп. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-0312-1153>  
TymNad@gmail.com

**Н.Є. ПАВЛЕНКО**, наук. співроб.,  
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,  
просп. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна  
<https://orcid.org/0009-0005-5660-8669>  
Pavnata@gmail.com

---

### ДЕЯКІ ПІДХОДИ ДО ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ НА ЦИФРОВИХ ПЛАТФОРМАХ

---

*Розглянуто ситуацію невизначеності, яка виникає під час розроблення та експлуатації цифрових платформ. Вона має різну природу і з'являється внаслідок об'єктивних причин, які закладені в самій природі задач, і суб'єктивних, які вносяться особою, що приймає рішення в процесі розв'язування задачі. Для її вирішення проводять аналіз поведінки системи за заданий проміжок часу та встановлюють певну закономірність, яку враховують при прогнозуванні майбутніх результатів.*

**Ключові слова:** цифрові платформи, платформна бізнес-модель, невизначеність, екосистема, модульна архітектура, граничні ресурси, комбінаторна оптимізація.

### Вступ

У сучасному світі цифрові платформи (ЦП) виступають основою для взаємодії та пропонують і надають послуги або продукти для задоволення потреб і отримання цінності користувачами. Впрова-

---

Цитування: Тимофієва Н.Є., Павленко Н.Є. Деякі підходи до вирішення проблеми невизначеності на цифрових платформах. *Information Technologies and Systems*, Київ, 2025, Том 5 (5), 3–21. <https://doi.org/10.15407/intechsys.2025.05.003>

© Publisher РН "Akademperiodyka" of the NAS of Ukraine, 2025. The article is published under an open access license CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

дження цифрових технологій сприяє розвитку ЦП і дає змогу змінювати їх масштаб, розширювати функційні можливості в різних ринкових контекстах, збільшувати цінність пропозицій. Забезпечення ціннісної пропозиції здійснюється за рахунок залучення до екосистеми ЦП користувачів зі сторони попиту, тобто споживачів продуктів / послуг і користувачів зі сторони пропозиції, тобто надавачів і розробників продуктів / послуг, яких ще називають доповнювачами. Розосередженість учасників екосистеми і розмитість меж між різними продуктами, ринками та галузями провокують виникнення проблем невизначеності в процесі проектування та експлуатації ЦП.

Ситуацію невизначеності досліджують в теорії прийняття рішень. Вона має різну природу. В прикладних задачах невизначеність виникає внаслідок нечіткої або неповної вхідної та поточної інформації. Тобто вона виникає внаслідок різних природних властивостей певної задачі, а також її вносить ситуація ризику.

## **Постановка задачі**

Розглянуто ситуацію невизначеності, яка виникає за різних обставин при створенні та експлуатації ЦП. Ця ситуація виникає внаслідок об'єктивних причин, які закладені в самій природі проблем, і суб'єктивних, які вносить розробник у разі закладення ситуації ризику в процес розв'язання. Необхідно виявити причини виникнення ситуації невизначеності та знайти способи ефективного її вирішення.

## **Аналіз досліджень та публікацій за темою**

Розповсюдження ЦП в різних галузях робить їх актуальним об'єктом наукових досліджень. Значна кількість робіт присвячена дослідженню ЦП у закордонній науковій літературі [1-10]. В [1] розглянуто проблеми розробки теорії для ЦП, у тому числі питання їх проектування, використання даних і впливу на повсякденне життя. В [2] досліджені чинники виникнення і властивості екосистем ЦП а також критичні фактори, що впливають на їх еволюцію. В [3] визначені основні концепції побудови екосистем, та досліджений взаємозв'язок між модульною архітектурою та процесами керування ЦП. В [4] розглянуті загальні характеристики ЦП та можливості застосування платформ для поштового зв'язку. В [5] досліджені тенденції розвитку монопольного становища ЦП та подані загальні прогнози щодо майбутнього платформного капіталізму. В [6] піднімаються питання масштабування платформ та інфраструктур і впливу масштабування на інновації і конкуренцію ЦП. В [7] на прикладі платформ мобільних платежів досліджено конкурентні стратегії ЦП, які сприяють створенню і наданню цінності. В [8] запропонована чотириетапна модель життєвого циклу та подано аналіз вимог до розвитку ЦП на

кожному етапі. В [9] розглянуто особливості створення і отримання цінності ЦП і зазначена необхідність регулювання діяльності ЦП для усунення випадків зловживання економічною владою над членами екосистеми. В [10] проаналізовано взаємовідносини між учасниками екосистеми ЦП, наведено способи розподілу влади і приклади стратегій керування екосистемою. Аспекти впровадження ЦП у різні сфери суспільного розвитку та способи трансформації бізнесу цифровими платформами висвітлено у працях вітчизняних вчених [11 – 15]. У монографії [11] розглянуто перспективи розвитку економіки України у цифрову епоху, який пов'язаний з розширенням використання ЦП. В [12] визначено основні проблеми функціонування ЦП і висвітлені моделі правового регулювання їх діяльності. У статті [13] розкрито значення ЦП для економічного та соціального розвитку, наведено підходи до класифікації ЦП та їх функцій. В [14] зазначена зростаюча роль ЦП у трансформації бізнес-моделей минулого і формуванні основних трендів розвитку цифрової економіки. В [15] визначено переваги, особливості і проблеми використання ЦП в економіці.

Дослідженню ситуації невизначеності, що виникає під час проектування та експлуатації ЦП, присвячено публікації [16–20]. Класифікацію невизначеності на основі проблем джерела знань подано у [16]. Основні характеристики ЦП, які породжують невизначеність на етапі її проектування, наведено у дослідженні [17]. Дослідженню невизначеності, яку провокує непрозорість алгоритмічного керування, присвячено статтю [18]. Джерела виникнення невизначеності цифрових інноваційних процесів і способи використання граничних ресурсів ЦП для її зниження досліджено у [19]. Стратегії користувачів ЦП для керування цією ситуацією розглянуто в [20].

При дослідженні ситуації невизначеності в процесі проектування та експлуатації ЦП основна увага приділяється невизначеності, що пов'язана з неповною вхідною та поточною інформацією, а також з нечіткими вхідними даними [21–22]. Незважаючи на спробу строго формалізувати невизначеність, наприклад [23], цим поняттям користуються на інтуїтивному рівні.

## **Підхід, що пропонується**

Ситуацію невизначеності встановлюємо шляхом аналізу діяльності членів екосистеми на ЦП. Виділяємо ту, яка виникає внаслідок об'єктивних причин та пов'язана з природою задачі, і суб'єктивних, які вносяться на етапах створення та експлуатації ЦП розробниками у разі закладення в процес розв'язання ситуації ризику. Також проводимо прогнозування майбутніх результатів. При експлуатації ЦП з'являються задачі, які відносяться до теорії масового обслуговування та теорії ігор. З використанням теорії комбінаторної оптимізації ці задачі змодельовано в межах теорії комбінаторної оптимізації. Такий

підхід дає змогу виявити природу невизначеності в задачах та знайти ефективні способи її вирішення.

## Означення цифрової платформи і екосистеми

Наразі в науковій літературі відсутнє єдине означення цифрової платформи. Наведемо деякі з існуючих означень.

Цифрова платформа – сукупність цифрових технологій, продуктів або послуг, що забезпечують технологічну основу, на якій зовнішні компанії можуть створювати власні додаткові продукти, технології або послуги [24].

Цифрова платформа – це цифрова інфраструктура, яка дає змогу взаємодіяти двом або більше групам [5].

Цифрова платформа – це набір цифрових ресурсів, включно з послугами та контентом, які дають змогу взаємодії між зовнішніми виробниками та споживачами, яка створює цінність [6].

Цифрова платформа – це розширювана кодова база програмної системи, яка забезпечує функційність ядра, що спільно застосовується модулями, які взаємодіють з ним, та інтерфейсами, через які відбувається взаємодія [25].

Запропонуємо означення платформи, яке на наш погляд відображає її основні властивості і можливості:

**Цифрова платформа** – це сукупність програмних і технічних засобів, які використовують необхідні технології і інформаційні ресурси для забезпечення взаємодії, надання продуктів / послуг і споживання їх групами користувачів з різними інтересами, а за умови зміни потреб користувачів їх розвивають розробники додаванням нових і модифікації наявних компонентів.

Фундаментальна організація ЦП має модульну архітектуру, яка містить ядро і набір периферійних компонентів (модулів) [26]. Вирішальну роль в еволюції дизайну ЦП відіграють граничні ресурси, тобто інтерфейси прикладного програмування (API), комплекти розробки програмного забезпечення (SDK) та метадані, які є незамінним інструментом для інтеграції модулів і створення нових та адаптації застарілих доповнень ЦП. Стандартизовані інтерфейси дають змогу повторно використовувати основні компоненти, що забезпечують функційність для периферійних модулів, і створювати додаткові інновації для широкого кола розробників з різнорідними знаннями та необхідними навичками.

Експлуатація ЦП супроводжується створенням та розвитком екосистеми. Екосистема – це група суб'єктів (людей, організацій, сервісів або технічних засобів), які спільно використовують ЦП для здійснення взаємодії та досягнення комерційної або соціальної мети. Формування екосистеми дуже важливе для становлення та розвитку ЦП, без екосистеми ЦП не виживе (в багатьох публікаціях

розглядаються життєві цикли та аналізуються можливості виживання ЦП) [27]. Діяльність членів екосистеми відбувається відповідно визначеним на основі взаємної згоди ролям, а саме: власника платформи, який вкладає ресурси для її побудови та розвитку; доповнювачів, які розширюють її функційність розробленням нових застосунків та наданням послуг; споживачів, які цю функційність використовують; оркестратора, який керує платформою. Розвиток екосистеми ЦП пов'язаний з поступовим розширенням кількості учасників, кола обслуговуваних спільнот і портфеля запропонованих послуг. Він відбувається під впливом стратегії керування, яка повинна враховувати інтереси всіх учасників.

Загальною метою членів екосистеми є створення цінності. Механізми створення, доставки та захоплення цінності визначає платформна бізнес-модель. Інновація бізнес-моделі ЦП полягає у застосуванні нових способів створення цінності впровадженням нових видів діяльності, нових способів зв'язування діяльності та/або нових способів керування діяльністю [28]. Підприємницька діяльність учасників екосистеми супроводжується необхідністю приймати рішення в умовах невизначеності, коли неможливо спрогнозувати певні події та отримати точні знання про результати реалізації цих рішень. Але невизначеність може виникнути і поза межами прийняття рішень, принести як негативний, так і позитивний досвід користувачам і відкрити нові інновації та створити конкурентні переваги ЦП [20].

## **Чинники виникнення невизначеності на етапах проєктування і експлуатації ЦП**

На етапі проєктування ЦП чинниками виникнення невизначеності є [16]:

- неможливість передбачення розробниками ЦП усіх сценаріїв взаємодії і поведінки користувачів;
- відсутність інформації про перспективу розвитку продуктів / послуг і відповідну адаптацію дизайну ЦП.

В роботі [17] зазначається, що невизначеність, яка виникає на етапі проєктування ЦП, обумовлена такими її характеристиками як посередництво і розширюваність.

В процесі експлуатації ЦП чинниками виникнення невизначеності є:

- непередбачувана і нетипова поведінка користувачів ЦП;
- обмін неякісною та асиметричною інформацією;
- невідповідність роботи новостворених програмних компонентів очікуванням і вимогам користувачів;
- нестабільність правил і несподівані зміни умов користування ЦП;
- непрозорість логіки алгоритмів ЦП для користувачів;

- характер відносин між власником ЦП і сторонніми розробниками;
- події зовнішнього середовища.

Інтенсивне та нетипове використання ЦП може сприяти створенню нових форм вмісту, розвитку взаємодій та інновацій, які не були передбачені під час проєктування. Прикладом таких дій користувачів на платформі *YouTube* є отримання цінності завдяки створенню власного контенту, наприклад, навчальних посібників або оглядових відео певних товарів, цікавих іншим користувачам. З іншого боку такі дії користувачів, як шахрайство, введення в оману, образлива поведінка, — призводять до негативних мережевих ефектів, додаткових витрат і зменшення цінності, виробленої для кожного користувача. Прикладом таких дій є затримка термінів виконання роботи, викрадення інтелектуальної власності, зникнення працівників після одержання авансу на платформі *WORK* тощо.

Надання неякісної та асиметричної інформації, небажання ділитися даними, відсутність консенсусу щодо права власності на дані, поширення неправдивої інформації заважають використанню ресурсів ЦП, ускладнюють взаємодію і підвищують невизначеність прийняття рішень учасниками екосистеми. Ризик споживачів пов'язано зі взаємодією з незнайомими постачальниками та невпевненістю у якості запропонованих товарів та послуг. Ризик постачальників пов'язано зі взаємодією з невідомими споживачами, сумнівами щодо їхніх уподобань і побоюваннями стосовно отримання прибутку. Взаємодія користувачів на ЦП супроводжується обміном даними, але невизначеною для користувачів залишається цінність згенерованих даних. Контроль, доступ і вилучення даних дають змогу власнику отримувати перевагу над користувачами ЦП і привласнювати цінність даних.

Розгортання нової версії ЦП може призвести до нових складнощів і невизначеності, оскільки створені додаткові модулі можуть викликати нові етичні проблеми, перешкоджати успішній співпраці для створення цінності, збільшити витрати і знизити конкурентоспроможність окремих користувачів, зробити актуальними непередбачені заздалегідь питання стратегії керування. Негативний досвід стосовно неналежного функціонування технологічної системи і невідповідність роботи новостворених програмних компонентів очікуванням і вимогам користувачів можуть викликати з їх боку недовіру до платформи і спонукати припинити користування її послугами.

Наявність дисбалансу влади у стосунках між власником і користувачами дає змогу власнику модифікувати правила і стандарти на свою користь. Приміром, з незначним попередженням або без нього, може бути змінено умови доступу до ЦП та інформації, структуру інтерфейсів, правила розподілу прибутку, систему винагород, норми поведінки та інші положення користування послугами ЦП.

Зміни може бути зумовлено державною політикою, новими стандартами або новою стратегією власника платформи.

Алгоритмічне керування втілює дисбаланс влади на ЦП і застосовується на ЦП для керування діяльністю і контролю за комунікацією учасників екосистеми. Алгоритми дають змогу реєструвати і оцінювати поведінку користувачів, безперервно оновлювати рейтинги, привертати увагу інших користувачів, впроваджувати функції зміцнення довіри і усунення невпевненості користувачів, здійснювати нагороди або накладати санкції та викликати у користувачів бажані реакції. Досвіду роботи з алгоритмами користувачі набувають під час експлуатації ЦП. Невизначеність, обумовлена непрозорістю алгоритмів, примушує користувачів обмінюватися між собою інформацією, іноді суперечливою, про досвід роботи з алгоритмами, обговорювати алгоритмічні рішення в онлайн-чатах і на форумах, оцінювати і осмислювати логіку алгоритмів з метою їхньої передбачуваності [18]. Але подібна інтерпретація є лише наближеною до фактичної логіки алгоритмів, і може бути навіть помилковою та потребувати адаптації, особливо у випадках з алгоритмами машинного навчання.

Взаємодія між власником і сторонніми розробниками супроводжується ризиком конфлікту інтересів. Перед власником постає невизначеність, яка ґрунтується на тому, що власник не може передбачити рівень специфічних виробничих знань сторонніх розробників, темп і якість виконуваних ними розробок, відповідність їхніх власних інтересів цінностям та цілям ЦП. Хоча власник не має права прямого ієрархічного контролю над сторонніми розробниками, саме він несе відповідальність за координацію та інтеграцію основних пропозицій ЦП і додаткових компонентів у єдині ціннісні пропозиції [29]. Регулювання ступеня відкритості граничних ресурсів дає змогу власнику обмежити коло розробників, заборонити їхню співпрацю з іншими ЦП, відсіяти низькоякісних доповнювачів, подолати невизначеність спільного створення цінності з невідомими доповнювачами, не допустити розробки неякісних і шкідливих програмних модулів. Залежність доповнювачів від власника ЦП створює для них джерело нестабільності та невизначеності у відносинах з власником, оскільки він може збільшити плату за користування ресурсами, змінити умови доступу до *API*, *SDK* та метаданих, адаптувати інтерфейси для несумісності з іншими платформами, ввести жорсткі правила поведінки [30]. Для зниження ризику, пов'язаного із залежністю від екосистеми однієї ЦП, сторонні розробники можуть використовувати мультихостинг, тобто пропонувати свої продукти різним платформам. Відносини між власником і сторонніми розробниками потребують вироблення компромісу між наданням їм самостійності та контролем їхньої діяльності [31].

Непередбачувані події повсякденного життя, поява нових або невикористаних технологій, зміна потреб ринку та уподобань спо-

живачів, загроза входу на ринок нових платформ і створення інновацій наявними платформами суттєво впливають на стратегію керування та діяльність учасників екосистеми. Наприклад, в умовах пандемії багато орендодавців житла на ЦП *Airbnb* і водіїв на ЦП *Uber* зазнали значних фінансових втрат, оскільки значно зменшився попит на їхні послуги. Перед власниками цих платформ постала проблема організації співпраці з іншими партнерами для розширення ціннісної пропозиції, підтримки життєздатності бізнес-моделі, модифікації дизайну. В результаті, водії ЦП *Uber* були залучені до доставки їжі на замовлення, а господарі ЦП *Airbnb* стали надавати своє житло готелям для організації корпоративних заходів. Невизначеність щодо споживання послуг може виникати як в разі використання деякої ЦП, так і в разі здійснення вибору між конкуруючими на ринку платформами. Тому передбачення тенденцій розвитку та гнучкість стратегії керування є ключовими факторами підтримки життєздатності екосистеми ЦП.

## **Види невизначеності інноваційних процесів на ЦП**

Для досягнення успіху ЦП повинна бути технологічно надійною та постійно інноваційною [32]. Відкладання впровадження інновацій становить для ЦП певний ризик, оскільки може знизитися продуктивність робочих процесів. Разом з тим впровадження інновацій приносить користувачам ЦП нові невизначеності та ризики, обумовлені різноманітністю доповнювачів та успішністю створених ними інновацій. В роботі [33] розглядаються такі типи невизначеності цифрових інноваційних процесів:

- екологічна невизначеність. Виникає під непередбачуваним впливом зовнішнього середовища, наприклад, соціокультурних тенденцій, демографічних зрушень, зміни попиту на продукти / послуги та пропозицій конкурентів;
- технічна невизначеність. Обумовлена швидким технологічним розвитком і відсутністю досвіду роботи з технологіями;
- організаційна невизначеність. Спостерігається під час динамічних змін процесу інноваційної діяльності;
- ресурсна невизначеність. Існує за недостовірної оцінки фінансових, технічних, людських та інших ресурсів;
- невизначеність відносин. Виникає в процесі взаємодії членів підприємницького середовища і заважає реалізації їхніх спільних та індивідуальних інтересів.

Невизначеність будь-якого типу створює додаткові проблеми для спільного створення цінності, впливає на дизайн і стратегію керування ЦП.

## Види невизначеностей, які виникають під час створення та експлуатації ЦП

Виходячи з попереднього аналізу в разі створення та експлуатації цифрових платформ узагальнимо виникнення невизначеності:

- невизначеність, яка виникає внаслідок неповної вхідної та поточної інформації;
- невизначеність, пов'язана з нечітко розробленими правилами оброблення та оцінювання інформації;
- особливий тип невизначеності, пов'язаний із ситуацією ризику.

Задача створення та експлуатації ЦП полягає у забезпеченні взаємодії між споживачами і надавачами послуг, за якої усі потенційні споживачі могли б скористатися заданими послугами ЦП за умови, що вони максимально задовольняють споживачів, і створена цінність розподіляється між учасниками екосистеми.

Ця задача зводиться до задачі з теорії з масового обслуговування [34]. Сформулюємо ці задачі в межах теорії комбінаторної оптимізації.

## Постановка задачі комбінаторної оптимізації

Задачі цього класу зазвичай задаються однією або кількома множинами, наприклад  $A$  та  $B$ , елементи яких мають будь-яку природу [35]. Назвемо ці множини базовими. Існує два типи задач. В першому типі кожному з цих множин можна подати як граф, вершинами якого є її елементи, а кожному ребру поставлено у відповідність число  $c_{sl} \in R$ , яке називають вагою ребра ( $R$  – множина дійсних чисел). Для зручності вважатимемо, що між елементами цих множин існують зв'язки, числове значення яких назвемо вагами. Величини  $c_{sl}$  назвемо вхідними даними і задамо їх матрицями. В другому типі задач між елементами заданої множини зв'язків не існує, а вагами виступають числа  $v_j \in R$ , яким у відповідність поставлено деякі властивості цих елементів, числові значення яких задаються скінченними послідовностями, що також є вхідними даними. Ці величини визначають значення цільової функції.

Для обох типів задач із елементів однієї з заданих множин, наприклад  $a_l \in A$ ,  $l \in \{1, \dots, n\}$ , утворюється комбінаторна множина  $W$  – сукупність комбінаторних конфігурацій певного типу (перестановки, вибірки різних типів, розбиття тощо). На елементах  $W$  комбінаторної множини  $W$  вводиться цільова функція  $F(w)$ . Необхідно знайти елемент  $w^*$  множини  $W$ , для якого цільова функція  $F(w)$  набуває екстремального значення в разі виконання заданих обмежень, тобто  $F(w^*) = \underset{w \in W^0 \subset W}{glob \ extr} F(w)$ , де  $\extr = \{\min, \max\}$ ,  $W^0$  – підмножина, яку визначають обмеженнями задачі.

Ринкова конкуренція присутня як між різними платформами, так і в екосистемі кожної платформи. Конкуренція між діючими

платформами розгортається за залучення споживачів, підтримку доповнювачів, розширення видів діяльності, зменшення вартості запропонованих послуг, виведення нових продуктів на ринок. Наявність конкурентних переваг і пропозиція привабливої вартості продуктів / послуг дає змогу ЦП захопити вагому частку ринку і зайняти потужніше порівняно з іншим платформами становище. Конкуренція між членами екосистеми однієї ЦП пов'язана з розробкою стратегій керування платформою; визначенням методів захоплення та створення цінності; формуванням ступеня відкритості; забезпеченням доступу до ресурсів; створенням балансу компромісів; побудовою відносин з доповнювачами. Хоча учасники екосистеми окремої ЦП співпрацюють для досягнення спільних цілей, вони також конкурують між собою, і можуть виконувати антагоністичні дії для задоволення власних інтересів і отримання максимальної частки створеної цінності.

### **Задачі комбінаторної оптимізації, які виникають під час розроблення та експлуатації ЦП**

Виділимо задачу з теорії масового обслуговування і змодельємо її в межах теорії комбінаторної оптимізації. Для цього розглянемо невизначеність, яка виникає перед учасниками екосистеми в процесі їхньої взаємодії для кількох платформ.

*Задача з теорії масового обслуговування.* Вона полягає у визначенні потужності ЦП залежно від заявок, що поступають від замовника. Позначимо підмножиною  $Z^t = \{z_1^t, \dots, z_{\xi^t}^t\}$  заявки, що поступають в  $t$ -ту ЦП від  $\xi^t$  замовників, а  $z_r^t = \{\tilde{z}_{r1}^t, \dots, \tilde{z}_{r\xi^t}^t\}$  – заявки, що поступають від  $r$ -го замовника в  $t$ -ту ЦП, де  $\tilde{z}_{r\gamma}^t$  – одна заявка,  $\xi^t$  – їх кількість,  $\gamma \in \{1, \dots, \xi^t\}$ . Оскільки  $\xi^t$  – величина випадкова, то виникає ситуація невизначеності. Вважаємо, що  $z_r^t = \{z_{r1}^t, \dots, z_{r\xi^t}^t\} \subset Z^t$  – найбільша кількість заявок, яка може поступити в  $t$ -ту ЦП від  $r$ -го замовника. Тоді необхідно визначити таке сполучення без повторень  $\mu^\lambda \in M$  елементів  $z_{r\gamma}^t$  із множини  $Z^t$ , за якого потужність ЦП була б збалансована, тобто  $\Phi_t(\mu^\lambda) \approx \sum_{r=1}^{\xi^t} \sum_{\gamma=1}^{\xi^t} \tilde{\Phi}_{r\gamma}(\mu^\lambda)$ , де  $\Phi_t(\mu^\lambda)$  – потужність  $t$ -ої ЦП,  $\tilde{\Phi}_{r\gamma}$  – кількість заявок від  $r$ -го замовника, які поступили в  $t$ -ту ЦП,  $M$  – множина сполучень без повторень [36].

У цій задачі під час визначення потужності ЦП виникає невизначеність через кількість заявок, які є випадковими величинами.

*Розроблення математичної моделі під час експлуатації ЦП з використанням теорії ігор у разі недобросовісних споживачів або надавачів послуг.* Цю задачу можна віднести до антагоністичних ігор двох учасників з прямо протилежними інтересами. Вона полягає в тому,

що в разі переходу від однієї ситуації до іншої із збільшенням (зменшенням) виграшу одного з гравців чисельно однаково зменшується (збільшується) виграш другого гравця. Їх ще називають іграми двох осіб з нульовою ставкою. Розумна поведінка гравців здійснюється на підставі принципу максиміну. Нижче наведемо математичну модель цієї задачі з використанням теорії комбінаторної оптимізації [35].

Задачу недобросовісних споживачів або надавачів послуг на одній платформі розглянемо як гру двох гравців з урахуванням таких критеріїв:

- мораль споживачів або надавачів послуг;
- зниження створеної та отриманої цінності споживачів або надавачів послуг.

Під цільовою функцією розуміємо таке її числове значення, яке визначає рівень моралі споживачів або надавачів послуг. Задача полягає у знаходженні між цими критеріями такої рівноваги, щоб споживачі або надавачі послуг співіснували комфортно. Як відомо з досвіду, на певному етапі збагачення споживачів або надавачів послуг їхня мораль починає знижуватися. Наступає момент, коли заради збагачення нехтуються закони моралі, що призводить до загальної руйнації створеної та отриманої цінності споживачів або надавачів послуг. В результаті і ті й інші втрачають всі накопичені матеріальні цінності.

Уведемо множини:  $A = (a_1, \dots, a_n)$ , кожен елемент  $a_j$ ,  $j \in \{1, \dots, n\}$ , якої відповідає ознакам, які характеризують рівень моралі споживачів або надавачів послуг;  $B = \{b_1, \dots, b_n\}$ , кожен елемент  $b_j$  якої визначає числову оцінку рівня моралі споживачів або надавачів послуг;  $\tilde{A} = (\tilde{a}_1, \dots, \tilde{a}_n)$ , кожен елемент  $\tilde{a}_l$ ,  $l \in \{1, \dots, n\}$ , відповідає ознакам, які характеризують способи зниження створеної та отриманої цінності споживачів або надавачів послуг;  $\tilde{B} = \{\tilde{b}_1, \dots, \tilde{b}_n\}$  кожен елемент якої  $\tilde{b}_l$  визначає числову оцінку зниження створеної та отриманої цінності споживачів або надавачів послуг.

Отже, задача визначення зниження створеної та отриманої цінності споживачів або надавачів послуг задається двома множинами  $A$  і  $\tilde{A}$ , між елементами яких відсутні зв'язки. Вхідними даними виступають скінченні послідовності  $B = \{b_1, \dots, b_n\}$  та  $\tilde{B} = \{\tilde{b}_1, \dots, \tilde{b}_n\}$ . Ця задача належить до другого типу.

Змодельовано цільову функцію і визначимо її аргумент.

Вважаємо, що кожному елементу  $b_j$  множини  $B$  відповідає елемент  $\tilde{b}_j$  із множини  $\tilde{B}$  і  $b_j, \tilde{b}_j \in \{-1, \dots, 0, \dots, 1\}$ ,  $b_j, \tilde{b}_j$  — дійсні числа. Якщо добробут споживачів або надавачів послуг забезпечує гармонійне їх існування, то ці величини додатні і  $b_j, \tilde{b}_j \geq \varepsilon$ ,  $b_j = \tilde{b}_j$ ,  $\varepsilon > 0$  — мінімальне значення, за якого можлива розумна поведінка гравців. Якщо  $b_j, \tilde{b}_j \in \{\tilde{\varepsilon}, \dots, \varepsilon\}$ , де  $\tilde{\varepsilon} < 0$  — найбільше значення, за якого добробут споживачів або надавачів послуг забезпечує гармонійне існування, то йдеться про антагоністичну гру двох учасників з прямо

протилежними інтересами. Якщо  $b_j, \tilde{b}_j < \tilde{\epsilon}$ , то руйнується мораль споживачів або надавачів послуг, знижується створена та отримана цінність споживачів або надавачів послуг. Тобто, виникає ситуація, за якої виграє один гравець (який збагачується), але в результаті програють обидва гравці.

В процесі розв'язання задачі із кожної множини  $A = (a_1, \dots, a_n)$  і  $\tilde{A} = (\tilde{a}_1, \dots, \tilde{a}_n)$  вибиранням певної кількості елементів утворюються сполучення без повторення, що є аргументом цільової функції. Із елементів множин  $A = (a_1, \dots, a_n)$  і  $\tilde{A} = (\tilde{a}_1, \dots, \tilde{a}_n)$  утворимо дві комбінаторні множини  $W$  і  $\tilde{W}$ . На цих множинах уведемо цільову функцію  $F(w, \tilde{w})$ , де  $w \in W$  і  $\tilde{w} \in \tilde{W}$  – сполучення без повторення. Задача полягає в знаходженні таких  $w^* \in W$  і  $\tilde{w}^* \in \tilde{W}$ , для яких уведена цільова функція  $F(w, \tilde{w})$  набуває максимального значення за умови, що  $F(w^*, \tilde{w}^*) \geq \delta$ , де  $\delta$  – мінімальна величина, за якої споживачі або надавачів послуг існують комфортно.

Змоделюємо вхідні дані функціями натурального аргументу  $\varphi(j) \Big|_1^n$ ,  $\tilde{\varphi}(j) \Big|_1^n$  та комбінаторними функціями  $\beta(f(j), w^k, \tilde{w}^i) \Big|_1^n$  і  $\tilde{\beta}(\tilde{f}(l), w^k, \tilde{w}^i) \Big|_1^n$ . Якщо із множини  $A$  вибирається елемент  $a_j$  то  $\beta_j(f(j), w^k, \tilde{w}^i) = 1$ . В іншому разі  $\beta_j(f(j), w^k, \tilde{w}^i) = 0$ . Відповідно, якщо із множини  $\tilde{A}$  вибирається елемент  $\tilde{a}_l$  то  $\tilde{\beta}_l(\tilde{f}(l), w^k, \tilde{w}^i) = 1$ . В іншому разі  $\tilde{\beta}_l(\tilde{f}(l), w^k, \tilde{w}^i) = 0$ . Оскільки поставлена задача розв'язується на двох комбінаторних множинах, то функції  $\beta(f(j), w^k, \tilde{w}^i) \Big|_1^n$  і  $\tilde{\beta}(\tilde{f}(l), w^k, \tilde{w}^i) \Big|_1^n$  залежать від двох змінних:  $w \in W$  і  $\tilde{w} \in \tilde{W}$ .

Цільова функція в цій задачі оптимізується за двома критеріями, які змоделюємо як середню величину сумарного добутку значень функції натурального аргументу та комбінаторної функції:

$$F^{(1)}(w^k, \tilde{w}^i) = \frac{\sum_{j=1}^n \beta_j(f(j), w^k, \tilde{w}^i) \varphi(j)}{q'}$$

і

$$F^{(2)}(w^k, \tilde{w}^i) = \frac{\sum_{j=1}^n \tilde{\beta}_j(\tilde{f}(j), w^k, \tilde{w}^i) \tilde{\varphi}(j)}{q''},$$

а

$$F(w^k, \tilde{w}^i) = \sum_{t=1}^2 F^{(t)}(w^k, \tilde{w}^i);$$

де  $q'$  – кількість одиниць в  $\beta(f(j), w^k, \tilde{w}^i) \Big|_1^n$ ,  $q''$  – кількість одиниць в  $\tilde{\beta}(\tilde{f}(j), w^k, \tilde{w}^i) \Big|_1^n$ .

Множини  $W$  і  $\tilde{W}$  складаються з підмножин ізоморфних сполучень без повторень. Оскільки знаходження оптимального розв'язку

проводиться на усіх їхніх елементах, то в процесі розв'язання задачі з використанням виразів  $F^{(1)}(w^k, \tilde{w}^i)$  і  $F^{(2)}(w^k, \tilde{w}^i)$  може виникати ситуація невизначеності, пов'язана зі структурою аргумента цільової функції [35]. Тому задача полягає в знаходженні такої підмножини ізоморфних сполучень без повторень, яка містить оптимальний розв'язок, що збігається з метою дослідження за умови  $F(w^k, \tilde{w}^i) > \delta$ .

Виходячи з викладеного наведемо таке означення.

**Означення.** Під невизначеністю в комбінаторній оптимізації (відповідно в разі проектування та експлуатації ЦП) розуміємо ситуацію, за якої внаслідок нечіткої чи неповної вхідної та поточної інформації неможливо одержати однозначний результат, або за вибраною мірою подібності, за змодельованими цільовими функціями, за розробленими правилами обробки та оцінки інформації, внаслідок особливої структури аргументу цільової функції (комбінаторної конфігурації) одержаний оптимальний результат не збігається з метою дослідження.

## Деякі способи вирішення ситуації невизначеності на ЦП

Вирішення проблеми невизначеності, що пов'язана з неповною вхідною та поточною інформацією, проводиться шляхом аналізу ситуації за певний проміжок часу. На основі цього аналізу встановлюють певну закономірність, яку враховують при прогнозуванні майбутніх результатів на поточному відрізьку часу.

Вирішення невизначеності користувачами ЦП, яка пов'язана із ситуацією ризику, супроводжується неоднозначністю щодо обрання варіанту дій та/або неможливістю передбачення ймовірних наслідків конкретного їх вибору. Сприйняття невизначеності користувачами ЦП має суб'єктивний характер. Під час експлуатації ЦП користувачі дотримуються таких стратегій:

- використовують продукти / послуги ЦП для задоволення своїх інтересів і потреб, незважаючи на можливість отримання негативних результатів і фінансових втрат;
- застосовують запобіжні заходи і звертаються до попереднього досвіду для пом'якшення сприйняття невизначеності і прийняття рішення щодо використання продуктів / послуг ЦП (наприклад, виконують самостійний пошук додаткової інформації про постачальників послуг, знаходять докладні описи продуктів / послуг, переглядають відгуки інших користувачів про продукти / послуги і про досвід спілкування з постачальником, порівнюють ціни і отримують інформацію про аналоги від третіх сторін, тощо);
- відміняють або відкладають використання продуктів / послуг ЦП доки не буде доступна додаткова інформація.

Під час розроблення та експлуатації ЦП керування невизначеністю полягає у зменшенні її в джерелі виникнення або подоланні

невизначеності шляхом мінімізації її впливу [19]. Зменшення та подолання невизначеності на ЦП досягають шляхом:

- збору інформації та поглиблення знань;
- еволюції бізнес-моделі;
- адаптації дизайну ЦП;
- застосування механізмів стратегії керування.

Розглянемо детальніше ці способи.

**Збір інформації та поглиблення знань.** Використання технологій інформаційно-комунікаційні технології (ІКТ) дає змогу збирати, аналізувати та оцінювати дані для фіксації дій користувачів на ЦП, формування для них індивідуалізованого контенту та орієнтування поведінки в бажаному напрямі [30]. Механізми зворотного зв'язку допомагають ЦП отримувати дані від користувачів різних сторін екосистеми. Аналіз великих обсягів даних дає змогу будувати рейтинги, спираючись на оцінки і відгуки користувачів, і створювати рекомендації, які впливають на їхні вподобання та заохочують до певних дій. Розвиток інновацій і повторне використання програмних компонентів пов'язані з керуванням знаннями. Для екосистеми, що розвивається або швидко змінюється, інформаційна база може бути невизначеною або взагалі відсутньою [37]. Для подолання дефіциту знань, створення інформаційної бази та організації співпраці розробників програмних компонентів використовуються довідники, настанови, вікі, служби підтримки, індивідуальна допомога та коучинг, хакатони, де розробники зустрічаються фізично або віртуально. Використання систем розпізнавання мовлення з підтримкою штучного інтелекту в поєднанні з інтелектуальним пошуком відповіді дає змогу збільшити швидкість оброблення даних і зменшити транзакційні витрати.

**Еволюція бізнес-моделі ЦП.** Невизначеність, доповнювачі та додаткові продукти стимулюють інноваційний процес бізнес-моделі ЦП [31]. Еволюція бізнес-моделі передбачає реалізацію низки узгоджених і взаємодоповнювальних дій учасників екосистеми і здійснюється шляхом розробки власних інновацій або копіювання і впровадження інновацій конкурентів [28]. Власні інновації бізнес-моделі ЦП полягають у створенні нових видів діяльності і відповідних елементів дизайну та дають змогу залучати до екосистеми нових користувачів або розширювати наявну базу користувачів для отримання радикально нових функцій та послуг. Наслідкування інновацій конкурентів дає змогу подолати невизначеність стосовно їх інноваційної діяльності та уникнути переходу користувачів на конкурентні платформи. Копіювання інновацій конкурентів потребує попереднього моніторингу діяльності суперника, ідентифікації елементів дизайну для імітації та подальшої інтеграції їх у бізнес-модель імітатора.

**Адаптація дизайну ЦП.** Адаптація дизайну ЦП передбачає підтримку інтеграції розподілених ресурсів; реформування та комбінацію програмних та апаратних компонентів; трансформацію про-

дуктів та послуг ЦП. Алгоритми мають значний вплив на керування невизначеністю, оскільки забезпечують підтримку роботи платформи [31]. Алгоритми використовуються для реалізації механізмів керування та функційних можливостей ЦП; контролю виконання правил і визначення спектра взаємодій; аналізу поведінки учасників екосистеми та обмеження варіативності дій заохоченням або застосуванням штрафних санкцій. Взаємодія розробників з різними групами користувачів полегшує впровадження нових ідей щодо варіантів дизайну та сприяє зниженню ризиків виникнення негативного досвіду в процесі користування продуктами / послугами ЦП. Для запобігання створення неякісних доповнень додатків в роботі [17] пропонується протягом всього життєвого циклу ЦП впроваджувати додаткові заходи для виявлення та усунення помилок в програмних модулях, зменшення негативних наслідків непередбачених сценаріїв використання платформи і взаємодій користувачів. Такими заходами є тестування нових доповнень у безпечному середовищі перед їх фактичним використанням в реальних умовах.

*Застосування механізмів стратегії керування.* Завданням стратегії є встановлення балансу і регулювання протиріч між відкритістю і контролем, створенням і захопленням цінності, співпрацею і конкуренцією, широким асортиментом і якістю доповнень. Стратегія містить прийняття і дотримання правил, які визначають взаємодію учасників екосистеми як всередині однієї сторони, так і між різними сторонами. Однак стратегія керування не обмежується тільки встановленням і контролем дотримання правил, а повинна спиратися на побудову відносин між учасниками екосистеми, підтримку їх надійного зв'язку з ЦП та заохочення інновацій для отримання стійкої вигоди. Ключовою проблемою керування екосистемою є координація та керування спільною діяльністю учасників екосистеми з використанням механізмів позадогівірного керування [38]. Гнучкість стратегії керування має вирішальне значення для мінімізації впливу невизначеності та підвищення продуктивності ЦП в непередбачуваних умовах. Має бути розроблено механізми, які пом'якшують наслідки виникнення та поширення невизначеності, наприклад, завдяки навчання, наданню адаптованої під конкретних користувачів інформації, використанню систем зворотного зв'язку для покращення комунікації, впровадженню методів аналізу даних і штучного інтелекту. Механізми можуть застосовуватися по-різному залежно від обставин, і кожен з механізмів може бути реалізовано у відповідь на різні типи невизначеності. В роботі [39] зазначається, що невизначеність пом'якшується трьома способами, що доповнюють один одного: епістемологічним завдяки збору інформації, онтологічним завдяки перетворенню раніше непередбачуваних елементів на «пізнаваний» вміст і методологічним шляхом забезпечення гібридних практик. Наприклад, для зменшення невизначеності щодо успішності про-

дуктів ЦП застосовується метод онлайн-опитування користувачів про задоволеність користуванням послугами. А застосування методів штучного інтелекту дає змогу невизначені ситуації, в яких розподіл ймовірностей можливих випадків невідомий, перетворювати на ризиковані, коли можливі випадки і ймовірність появи кожного з них стають відомими.

У динамічному світі платформ і екосистем невизначеність змінюється під впливом історії взаємодій і послідовності реакції учасників екосистеми на відповідні невизначеності [16]. Рішення, які приймають учасники екосистеми, залежать від їхньої ролі в екосистемі та стадії життєвого циклу ЦП. Ситуація невизначеності, пов'язана з неповною вхідною і поточною інформацією, а також з особливою структурою аргументу цільової функції, вирішується самоналагоджувальними алгоритмами.

## Висновки

Невизначеність в процесі діяльності учасників екосистем ЦП виникає внаслідок неповної вхідної та поточної інформації, вона пов'язана з нечітко розробленими правилами обробки та оцінки інформації. Виділено особливий вид невизначеності, який пов'язаний із ситуацією ризику. Моделювання деяких з цих задач в межах теорії комбінаторної оптимізації показує, що ця ситуація виникає і внаслідок особливої структури аргументу комбінаторної оптимізації. Вирішення цієї ситуації, що пов'язана з неповною вхідною та поточною інформацією, проводиться шляхом аналізу поведінки системи за певний проміжок часу. На основі цього аналізу встановлюють певну закономірність, яку враховують при прогнозуванні майбутніх результатів на поточному відрізку часу.

### Фінансування

Дослідження підготовлено за грантової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках реалізації проекту «Сучасний програмно-апаратний комплекс для тренування операторів безпілотних літальних апаратів» (реєстраційний номер 2023.04/0082) конкурсу «Наука для зміцнення обороноздатності України».

## REFERENCES / ЛІТЕРАТУРА

1. Mark de Reuver, Carsten Sørensen, Rahul C. Basole. The digital platform: a research agenda. *Journal of Information Technology*, 2018, Vol. 33, 124–135. <https://doi.org/10.1057/s41265-016-003>
2. Jacobides M.G., Cennamo C., Gawer A. Towards a theory of ecosystems. *Strategic Management Journal*, 2018, Vol. 39 (8), 2255–2276. <https://doi.org/10.1002/smj.2904>
3. Tiwana A., Konsynski B., Bush A. Platform evolution: coevolution of architecture, governance, and environmental dynamics. *Information systems research*, 2010, Vol. 21 (4), 675–687. <https://doi.org/10.1287/isre.1100.0323>
4. Parker D., Van Alstyne M. A Digital Postal Platform: Definitions and a Roadmap. 2019. URL: [https://ide.mit.edu/wp-content/uploads/2016/04/2012.01\\_Parker\\_Van-Alstyne\\_A-Digital-Postal-Platform\\_296.pdf?x96981](https://ide.mit.edu/wp-content/uploads/2016/04/2012.01_Parker_Van-Alstyne_A-Digital-Postal-Platform_296.pdf?x96981) [Accessed 30 Jul. 2025]

5. Srnicek N. Platform Capitalism. Polity Press, 2017, 171 P.
6. Constantinides P., Henfridsson O., Parker G.G. Introduction – Platforms and infrastructures in the digital age. *Information Systems Research*, 2018, Vol. 29 (2), 381–400. <https://doi.org/10.1287/isre.2018.0794>
7. Kazan E., Tan C.-W., Lim E., Sørensen C., Damsgaard J. Disentangling Digital Platform Competition: The Case of UK Mobile Payment Platforms. *Journal of Management Information Systems*, 2018, Vol. 35 (1), 180–219. <https://doi.org/10.1080/07421222.2018.1440772>
8. Teece D., Dynamic capabilities and digital platform lifecycles. *Advances in Strategic Management Entrepreneurship, Innovation, and Platforms*, 2017, Vol. 37, 211–225. <https://doi.org/10.1108/S0742-332220170000037008>
9. Gawer, A. Digital platforms and ecosystems: remarks on the dominant organizational forms of the digital age. *Innovation*, 2021, Vol. 24 (1), 110–124. <https://doi.org/10.1080/14479338.2021.1965888>
10. Hein A., Schreieck M., Riasanow T. et al. Digital platform ecosystems. *Electron Markets*, 2020, Vol. 30, 87–98. <https://doi.org/10.1007/s12525-019-00377-4>
11. Liashenko V.I., Vyshnevskiy O.S. Digital modernization of Ukraine's economy as an opportunity for breakthrough development: monohrafiia. In: *ekonomiky promyslovosti NAN Ukrainy*, Kyiv, 2018. 252 p. [In Ukrainian: Ляшенко В.І., Вишневецький О.С. Цифрова модернізація економіки України як можливість проривного розвитку]
12. Kokhan V.P. Digital platform as a digital economy tool. *Law and innovations*, 2021, Vol. 33 (1), 29–34. [In Ukrainian: Кохан В.П. Цифрова платформа як інструмент цифрової економіки] [https://doi.org/10.37772/2518-1718-2021-1\(33\)-4](https://doi.org/10.37772/2518-1718-2021-1(33)-4)
13. Sichkarenko K.O. Digital platforms: classification approaching and the role of economic development defining. *Black sea economic studies*, 2018, Vol. 35, 28–32. [In Ukrainian: Січкаренко К.О. Цифрові платформи: підходи до класифікації на визначення ролі в економічному розвитку] URL: [https://bses.in.ua/journals/2018/35\\_2\\_2018/7.pdf](https://bses.in.ua/journals/2018/35_2_2018/7.pdf) [Accessed 30 Jul. 2025]
14. Semenoh A.Yu. Digital platform ecosystems as a factor of business transformation within digital economy framework. *Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design. Series: Economic sciences*, 2019, Vol. 137 (4), 39–50. [In Ukrainian: Семеног А.Ю. Екосистеми цифрових платформ як фактор трансформації бізнесу в умовах цифрової економіки] <https://doi.org/10.30857/2413-0117.2019.4.4>
15. Pysarevskya H. I., Kutsenko T. M., Martovytskyi A. D. Tsyfrovi platformy v ekonomitsi: suchasni tendentsii ta napriamy rozvytku. *Ukrainskyi zhurnal prykladnoi ekonomiky ta tekhniky*. 2023. Vol. 8. No 4, 174–178. [In Ukrainian: Писаревська Г. І., Куценко Т. М., Мартовицький А. Д. Цифрові платформи в економіці: сучасні тенденції та напрями розвитку] <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2023-4-27>
16. Alsahli A., Bantan. M. Uncertainty in Digital Platforms and Ecosystems: The Dynamic Interplay Between Knowledge Problems. *The 55th Hawaii International Conference on System Sciences 2022*, 6739–6748. <https://doi.org/10.24251/HICSS.2022.815>
17. de Reuver M., van Wynsberghe A., Janssen M., & van de Poel I. Digital platforms and responsible innovation: expanding value sensitive design to overcome ontological uncertainty. *Ethics and Information Technology*, 2020, Vol. 22 (3), 257–267. <https://doi.org/10.1007/s10676-020-09537-z>
18. Heiland H. Black Box Power: Zones of Uncertainty in Algorithmic Management. In: *Armano, E., Briziarelli, M., and Risi, E. (eds.), Digital Platforms and Algorithmic Subjectivities*, University of Westminster Press, London, 2022, 75–86. <https://doi.org/10.16997/book54.f>
19. Sterk F., Heinz D., Hengstler P., Weinhardt C. Reallocating Uncertainty in Incumbent Firms through Digital Platforms: The Case of Google's Automotive

- Ecosystem Involvement. ICIS 2023 Proceedings, Governance, Digital Strategy, and Value, 3, Article 2477. URL: [https://aisel.aisnet.org/icis2023/gov\\_strategy/gov\\_strategy/3](https://aisel.aisnet.org/icis2023/gov_strategy/gov_strategy/3) [Accessed 30 Jul. 2025]
20. Pérez López R., Yrjölä M., Becker L., Panina E., & Saarijärvi H. An experiential perspective on uncertainty in peer-to-peer platform services. *Journal of Service Management*, 2025, Vol. 36 (6), 29–52. <https://doi.org/10.1108/JOSM-04-2024-0170>
  21. Tymofiiieva N.K. On the nature of uncertainty and variable criteria in partitioning problems. *Problems of Control and Information Science*, 2009, Issue 5, 88–99. [In russian]
  22. Tymofiiieva N.K. About unraveling the problems of combinatorial optimization in minds of insignificance. Newsletter of the Vinnitsa Polytechnic Institute, 2012, Issue 6, 157–162. [In Ukrainian: Тимофієва Н.К. Про розв'язання задач комбінаторної оптимізації в умовах невизначеності]
  23. Yvanenko V.Y., Labkovskiy V.A. The problem of uncertainty in decision-making problems. *Nauk. dumka*, Kyiv, 1990, 136 p. [In russian]
  24. Evans P.C., Gawer A. *The Rise of the Platform Enterprise: A Global Survey*. The Center for Global Enterprise, 2016. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35887.05280>
  25. Baldwin C., Woodard J. *The Architecture of Platforms: A Unified View*. Research Collection School of Information Systems, 2009, 19–44. <https://doi.org/10.4337/9781849803311.00008>
  26. Tymofiiieva N.K., Pavlenko N.I., Shevchenko S.A. Ways of classifying digital platforms. *Control Systems and Computers*, 2024, Issue 2, 10–20. [In Ukrainian: Тимофієва Н.К., Павленко Н.Є., Шевченко С.А. Способи класифікації цифрових платформ] <https://doi.org/10.15407/csc.2024.02.010>
  27. Zysman, J., Kenney, M. Intelligent Tools and Digital Platforms: Implications for Work and Employment. *Intereconomics*, 2017, Vol. 52, 329–334. <https://doi.org/10.1007/s10272-017-0699-y>
  28. Zhao Y., Von Delft S., Morgan-Thomas A., Buck T. The evolution of platform business models: Exploring competitive battles in the world of platforms. *Long Range Planning*, 2019, Vol. 53 (4), Article 101892. <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2019.101892>
  29. Jaworski M. Digital platforms and data-driven value creation, *Research Reviews of Czestochowa University of Technology. Management*, 2023, Issue 52, 35–48. <https://doi.org/10.17512/znpcz.2023.4.03>
  30. Cutolo D., Kenney M. Platform-dependent entrepreneurs: Power asymmetries, risks, and strategies in the platform economy. *Academy of Management Perspectives*, 2021, Vol. 35 (4), 584–605. <https://doi.org/10.5465/amp.2019.0103>
  31. Daradkeh M. Exploring the Boundaries of Success: A Literature Review and Research Agenda on Resource, Complementary, and Ecological Boundaries in Digital Platform Business Model Innovation. *Informatics*, 2023, Vol. 10 (2), Article 41. <https://doi.org/10.3390/informatics10020041>
  32. Lang N., Lechner C., Wurzer C., Dexheimer M. Four Strategies to Orchestrate a Digital Ecosystem. *International Business*, 2020. URL: <https://www.bcg.com/publications/2020/four-strategies-to-orchestrate-digital-ecosystem> [Accessed 30 Jul. 2025]
  33. Ramirez Hernandez T., Kreye M.E. Uncertainty profiles in engineering-service development: exploring supplier co-creation. *Journal of Service Management*, 2021, Vol. 32 (3), 407–437. <https://doi.org/10.1108/JOSM-08-2019-0270>
  34. Hnedenko B.V., Kovalenko Y.N. *Lektsyy po teoryi massovoho obsluzhyvanyia*. Kyev: KVYRTU, 1969. 109 p.
  35. Tymofiiieva N.K. Theoretical and numerical methods for solving combinatorial optimization problems. Author's abstract of the dissertation, V.M. Glushkov Institute of Cybernetics, Kyiv, 2007, 32 p. [In Ukrainian: Тимофієва Н.К. Теоретико-числові методи розв'язання задач комбінаторної оптимізації]
  36. Timofijeva N.K., Gritsenko V.I. Modeling and Solving an Application Problems of Combinatorial Optimization Arised in Intelligent Geodistribution Dynamical Systems. *Control Systems and Computers*, 2014, Vol. 249 (1), 8–25.

37. Nerbel J. F., Kreutzer M. Digital platform ecosystems in flux: From proprietary digital platforms to wide-spanning ecosystems. *Electronic Markets*, 2023, Vol. 33 Article 6. <https://doi.org/10.1007/s12525-023-00625-8>
38. Adner R. Ecosystem as structure: An actionable construct for strategy. *Journal of Management*, 2017, Vol. 43 (1), 39-58. <https://doi.org/10.1177/0149206316678451>
39. Raneri S., Lecron F., Hermans J. and Fouss F. Predictions through Lean startup? Harnessing AI-based predictions under uncertainty. *International Journal of Entrepreneurial Behavior & Research*, 2023, Vol. 29 (4), 886-912. <https://doi.org/10.1108/IJEER-07-2021-0566>

Отримано / Received 31.07.2025

N.K. TYMOFIJEVA, DSc (Engineering), Senior Researcher, Head of the Department, Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine, 40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-0312-1153>  
tymNad@gmail.com

N.Ye. PAVLENKO, Researcher, Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine, 40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine  
<https://orcid.org/0009-0005-5660-8669>  
Pavnata@gmail.com

#### SOME APPROACHES TO ADDRESSING UNCERTAINTY ON DIGITAL PLATFORMS

**Introduction.** In the modern world, digital platforms (DPs) are the basis for interaction and offer and provide services or products to meet needs and receive value from users. The dispersal of ecosystem participants and the blurring of the boundaries between different products, markets, and industries provoke the problem of uncertainty in the process of design and operation of the DPs. The situation of uncertainty is of a different nature. It is due to objective reasons that are laid down in the very nature of the tasks and subjective reasons, which the developer introduces, that is, it arises from the various natural properties of a certain problem, as well as the risk situation.

**The purpose of the paper** is to investigate the situation of uncertainty, which occurs when creating and exploiting the DPs, and which arises under different circumstances. It is necessary to identify the causes of the situation of uncertainty and find ways to solve it effectively.

**Results.** We establish the situation of uncertainty by analyzing the activities of the members of the ecosystem of the DP. We distinguish the one that arises from objective reasons and the nature related to the nature of the problem, and the subjective, which are introduced at the stages of creation and operation of the DP, and risk situations. There are problems that relate to the theory of mass service and game theory. These problems are modeled within the framework of combinatorial optimization theory.

**Conclusions.** The uncertainty in the process of activity of participants in the DP ecosystem arises due to incomplete input and current information, which is related to the fuzzy processing and evaluation rules of information. There is a special type of uncertainty that is associated with the risk situation. Modeling some of these tasks within the theory of combinatorial optimization shows that this situation arises as a result of the special structure of the combinatorial optimization argument. The solution to this situation related to incomplete input and current information is carried out by analyzing the behavior of the system over a period of time. On the basis of this analysis, they establish a certain pattern, which is taken into account when predicting future results for the current period.

**Keywords:** *digital platforms, platform business model, uncertainty, ecosystem, modular architecture, boundary resources, combinatorial optimization.*

---

# COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION

## КОМП'ЮТЕРНИЙ ЗІР ТА РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ

<https://doi.org/10.15407/intechsys.2025.05.022>  
УДК 004.51

**В.М. КИЙКО**, канд. техн. наук, старш. наук. співроб., пров. наук. співроб.,  
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,  
просп. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна  
<https://orcid.org/0009-0005-6605-0339>  
[kiiko@gmail.com](mailto:kiiko@gmail.com)

### ВИЗНАЧЕННЯ МАСШТАБУ ТА КУТА ПОВОРОТУ ДЛЯ ДОВГОСТРОКОВОГО ВІДСТЕЖЕННЯ ОБ'ЄКТА У ВІДЕО

---

Надійність відстеження у відео значною мірою залежить від ефективності (точності та порівняно малої обчислювальної складності) задіяних алгоритмів визначення масштабу та кута повороту об'єкта відстеження на зображеннях. Пропонується алгоритм для оцінки цих параметрів на основі пошуку відповідних ключових точок (КТ) на кожному кадрі до КТ у моделі об'єкта  $M$ , що складається із КТ об'єкта та навколишнього фону. Алгоритм переважно може бути задіяний в умовах, коли зміни масштабу та кута повороту головним чином є наслідком змін руху камери або дій оператора і в значній мірі корелюють зі змінами на фоні, що зазвичай відповідає відеоспостереженню з літального апарата, зокрема БПЛА. Переваги алгоритму полягають у тому, що є порівняно більш стійким до наявності помилок в визначенні відповідних пар КТ, а також може бути використаний під час тривалої відсутності об'єкта у відео для оцінки масштабу та кута повороту шляхом пошуку КТ на зображенні, що відповідають до КТ фону у  $M$ . Це виконується з метою оновлення моделі об'єкта і його детектування після появи у відео зі значно зміненими параметрами.

Наведено приклади використання алгоритму для довгострокового відстеження із застосуванням запропонованого критерію наявності об'єкта в полі зору камери, а також двох способів оновлення  $M$  за його присутності або відсутності на зображеннях.

**Ключові слова:** відстеження об'єктів, BRISK ключові точки, KCF алгоритм відстеження, НОГ ознаки, масштаб та кут повороту об'єкта на зображенні, детектування та розпізнавання об'єктів.

---

Цитування: Кийко В.М. Визначення масштабу та кута повороту для довгострокового відстеження об'єкта у відео. Information Technologies and Systems, Київ, 2025, Том 5 (5), 22–38. <https://doi.org/10.15407/intechsys.2025.05.022>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2025. Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

## **Вступ**

Задача відстеження полягає у безперервному визначенні положення довільного об'єкта (цілі) у відео після того як його детектував оператор або інші засоби на початковому кадрі. Алгоритми (трекери) для виконання відстеження розділяють на такі, що забезпечують короткочасне [1–8] або більш складне довгострокове (тривале) відстеження у відео [9–17]. Довгострокове відстеження стосується визначення місцезнаходження довільної цілі у відносно довгому відео в умовах змін подання на зображеннях, а також можливого порівняно тривалого зникнення з поля зору камери. Ключовою проблемою довгострокового відстеження є відновлення цілі після періоду відсутності або збоїв відстеження [15], тому що за цей час можуть значно змінитись не тільки координати, а також масштаб та кут повороту цілі, знання яких збільшує точність та надійність детектування. Внаслідок цього після тривалого зникнення пошук цілі необхідно виконувати не локально, а в межах всього зображення і значних інтервалів можливих змін масштабу та кута повороту.

Основні складнощі задачі відстеження полягають у різноманітні об'єктів та їх подання внаслідок зміни масштабу, орієнтації, освітлення, перекриття або зникнення з поля зору, а також вимогою відстеження у реальному часі. Наразі не існує єдиного методу подолання всіх цих складнощів, а скоріше сукупність алгоритмів та засобів для зменшення впливу на результат відстеження кожного з цих факторів. У цій статті переважно розглядаються та пропонуються алгоритми для забезпечення надійності детектування та відстеження за порівняно значних змін масштабів та орієнтації об'єктів. Незважаючи на наявність таких алгоритмів, поки що розпізнавання об'єктів у значно різних масштабах залишається однією з недостатньо вирішених проблем комп'ютерного зору [29]. Надалі задача відстеження розглядається в поширених на практиці умовах, коли об'єкт зміщується на зображеннях у відео переважно повільно, а зміни його масштабу та кута повороту головним чином є наслідком змін параметрів руху камери та дій оператора і значною мірою корелюють зі змінами відповідних параметрів фону. Такі умови зазвичай відповідають відеоспостереженню з літального апарата, зокрема БПЛА, що знаходиться достатньо високо над поверхнею Землі.

Найбільш відомими є такі три різновиди алгоритмів для відстеження цілі у відео: 1) дискримінаційні кореляційні фільтри [1–3, 9–13, 22, 23]; 2) на основі навчання на нейронних мережах [4, 5, 14–19]; і 3) через детектування та пошук відповідності так званих «ключових точок» (КТ) на порівнюваних зображеннях [6–8]. Надійність відстеження з допомогою кожного з цих алгоритмів значною мірою залежить від точності визначення масштабу та кута повороту об'єкта на зображенні, а також спроможності забезпечувати інваріантність на-

дійного відстеження від цих параметрів. Зазначені алгоритми відстеження застосовують різні підходи і засоби, в тому числі для визначення масштабу та кута повороту, мають свої області для кращого використання і можуть сумісно використовуватись, взаємно доповнюючи один одного [8–12, 17].

Привабливі властивості трекерів на основі визначення відповідності КТ полягають зокрема у можливості відстеження не тільки так званих «жорстких» об'єктів, а й таких, що складаються з кількох частин, які можуть незалежно один від одного змінюватись з часом або зникати з поля зору. Алгоритми [6–8] мають також наступні недоліки. Оцінювання змін масштабу та повороту на основі відповідності тільки КТ об'єкта без врахування КТ фону не є достатньо надійним, особливо в умовах малої кількості КТ. Зазначені алгоритми не призначено для визначення змін масштабу та кута повороту на зображеннях за відсутності на них об'єкта відстеження і тому можуть забезпечувати відстеження в умовах лише короткочасної відсутності об'єкта, під час якої масштаб та кут повороту мало змінюються.

Метою дослідження є розроблення алгоритму визначення змін масштабу та кута повороту об'єкта, який долає вказані недоліки для отримання надійніших результатів відстеження об'єктів у складних умовах.

Отримано такі основні результати:

- розроблено алгоритм визначення змін масштабу та кута повороту об'єкта у відео на основі відповідних КТ об'єкта і фону за наявності значної кількості помилок у знайдений відповідності КТ на порівнюваних зображеннях;
- запропоновано спосіб визначення масштабу та кута повороту зображень у відео за відсутності об'єкта на цих зображеннях з метою оновлення моделі об'єкта і його детектування після появи на зображеннях із суттєво зміненими значеннями цих параметрів.

Далі у статті наведено огляд відомих алгоритмів для відстеження та визначення масштабу об'єктів на зображеннях на основі використання дискримінаційних кореляційних фільтрів, нейронних мереж та пошуку відповідності КТ на зображеннях, подано розроблені алгоритми визначення змін масштабу та кута повороту об'єкта, що використовуються в алгоритмі для довгострокового відстеження об'єкта у відео, що базується також на моделі об'єкта  $M$  і застосованих алгоритмах пошуку відповідності КТ на кожному кадрі до КТ у  $M$  та оновлення  $M$  в процесі відстеження.

## Огляд споріднених алгоритмів

Дискримінаційні кореляційні фільтри використовують швидке перетворення Фур'є (ШПФ) при навчанні та відстеженні об'єктів у відео. Навчання фільтра  $W$  виконується на основі лінійної або нелінійної

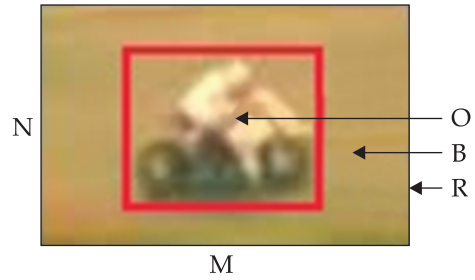


Рис. 1. Ділянки зображень об'єкта (O) та навколишнього фону (B) під час навчання фільтрів.

регресії шляхом вирішення відповідно однієї з двох наступних задач пошуку мінімуму цільової функції як суми квадратичних відхилень кореляцій від заданих значень [1, 2]:

$$W = \arg \min_w \sum_{m,n} |x_{m,n}(w) - y(m,n)|^2 + \lambda |w|^2, \quad (1)$$

$$W = \sum_{m,n} \alpha(m,n) \cdot \varphi(x_{m,n}) = \arg \min_w \sum_{m,n} |\langle \varphi(x_{m,n}), w \rangle - y(m,n)|^2 + \lambda |w|^2, \quad (2)$$

де  $x = x_{0,0}$  – зображення ділянки  $M \times N$  на початковому кадрі, що містить об'єкт в оточенні навколишнього фону (Рис. 1);  $x_{m,n}$  ( $m = 0, 1 \dots M - 1, n = 0, 1 \dots N - 1$ ) – сукупність прикладів об'єкта для навчання шляхом застосування циклічного оператора циркулянтної матриці для зсувів еталонного зображення  $x$  у горизонтальному та вертикальному напрямках;  $y(m, n)$  – мітки, що відповідають  $x_{m,n}$  і дорівнюють відстаням по функції Гауса між  $x$  та  $x_{m,n}$ ;  $\varphi$  – невідома функція відображення первинних ознак на зображенні у новому просторі, що індукована ядром  $k$  (Гаусова функція близькості двох зображень з первинними ознаками як яскравості або коди кольору пікселів) і задовольняє умові  $\langle \varphi(f), \varphi(g) \rangle = k(f, g)$ ;  $\alpha$  – матриця коефіцієнтів (двоїстих змінних), що визначається внаслідок вирішення задачі (2);  $\lambda \geq 0$  – параметр регуляризації, для протидії так званому «перенавчанню» та діленню на нуль за обчислень  $\alpha$  за формулою (3).

Задача навчання (1) вирішується з використанням первинних ознак зображення об'єкта, а (2) – більш інформативних ознак, у тому числі HOG ознак [21], що є результатом нелінійного перетворення цих первинних ознак. Коефіцієнти  $\alpha$  в результаті вирішення (2) визначаються за формулою

$$A = F(\alpha) = \frac{F(y = \{y(m,n) | (m,n) \in \{0,1,\dots,M-1\} \times \{0,1,\dots,N-1\}\})}{F\{k(x_{m,n}, x)\} + \lambda}, \quad (3)$$

якщо  $k(f_{m,n}, g_{m,n}) = k(f, g)$  для всіх  $m, n, f, g$ , що виконується зокрема для Гаусова ядра  $k$  у алгоритмі [2] (KCF – kernelized correlation filter).

Після навчання пошук об'єкта виконується на ділянці  $z$  у наступному кадрі з розмірами  $M \times N$  і центральною точкою, що збіга-

ється з положенням об'єкта у попередньому кадрі, шляхом обчислення матриці значень відгуків фільтра за формулою

$$\bar{y} = F^{-1}(A \circ F(\varphi(z) \cdot \varphi(z))), \quad (4)$$

де  $\bar{x}$  — подання об'єкта з допомогою ознак, що оновлюється під час відстеження;  $\circ$  — поелементне множення двох матриць. Після цього визначаються координати об'єкта, що відповідають положенню максимального значення відгуку на матриці  $\bar{y}$ .

Модель об'єкта складається з матриці коефіцієнтів  $A$  та подання  $\bar{x}$  об'єкта за допомогою *HOG* (*Histogram of Oriented Gradients*) ознак [21] і оновлюється під час відстеження за формулами:

$$\begin{aligned} \bar{x}(t) &= (1 - \beta) \bar{x}(t - 1) + \beta \bar{x}(t), \\ \bar{A}(t) &= (1 - \beta) \bar{A}(t - 1) + \beta \bar{A}(t), \end{aligned} \quad (5)$$

де  $t$  — індекс поточного кадра і  $\beta$  — коефіцієнт оновлення моделі при навчанні.

Гіпотетично *KCF* може використовуватись не тільки для визначення нового положення цілі на кожному кадрі, а також змін масштабу, якщо застосовувати в ньому не двовимірні, а тривимірні фільтри із значеннями масштабу у третьому вимірі. Однак, таке рішення не є ефективним унаслідок значного зростання обчислювальної складності алгоритму. Тому було розроблено порівняно швидкі алгоритми [10, 23, 24] для визначення змін масштабу після визначення положення цілі шляхом побудови піраміди зображень з різним масштабом і ознаками на кожному рівні, обчислення значень кореляції на всіх рівнях піраміди і визначення нового масштабу, що відповідає максимальному з цих значень.

У [10] використовуються два фільтри, що навчаються на основі вирішування задачі нелінійної регресії. Перший фільтр  $R_C$  застосовується для визначення положення об'єкта, використовує двовимірну сукупність зображень об'єкта та фону з розмірами  $M \times N$  для навчання (приклад на Рис. 1), а другий фільтр  $R_T$  — масштабу об'єкта на кожному кадрі з використанням порівняно малої одномірної сукупності прикладів зображень тільки об'єкта з різними масштабами. Хай  $P \times Q$  — розміри зображення  $z_t$  об'єкта (в межах ділянки  $o$  на Рис. 1) на поточному  $t$ -му кадрі,  $d$  — коефіцієнт зміни масштабу і  $N_s$  — кількість рівнів піраміди і оцінюваних масштабів  $S = \left\{ d^n \mid n = \left\lfloor -\frac{N_s - 1}{2} \right\rfloor, \left\lfloor -\frac{N_s - 3}{2} \right\rfloor, \dots, \left\lfloor \frac{N_s - 1}{2} \right\rfloor \right\}$  відносно масштабу об'єкта на попередньому кадрі. На першому етапі алгоритму для кожного з масштабів  $s \in S$  на зображенні виділяється ділянка  $J_s$  з розмірами  $sP \times sQ$  і центром в попередньо визначеній точці положення об'єкта, після чого розміри  $J_s$  змінюються на  $P \times Q$ . Далі обчислюється

подання  $x_s$  зображення  $J_s$  з допомогою ознак з подальшим обчисленням карти відгуків  $Y_s$  фільтра  $R_T$  за формулою (4). На заключному етапі визначається масштаб  $s_t = \arg \max_s (\max(Y_s) \mid s = 1, \dots, S)$ . Оновлення обох фільтрів відбувається тільки за умови, що максимальні значення відгуків фільтрів перевищують попередньо задані порогові значення. У [23] на відміну від [10] використовується лінійна регресія під час навчання фільтрів, розмір зображень  $J_s$  не змінюється на  $P \times Q$ , і оновлення фільтрів відбувається на кожному кадрі. У [24] на відміну від [10, 23] використовується тільки один фільтр з розмірами  $M \times N$  для визначення координат і масштабу об'єкта на кожному кадрі.

Для прикладу, якщо  $d = 1,02$  і зміна масштабу на сусідніх кадрах може бути від 0 до 6%, то  $N_s = 7$  і  $S = \{0,94, 0,96, 0,98, 1, 1,02, 1,04, 1,06\}$ . Це є цілком прийнятним для визначення масштабу на сусідніх кадрах і пошуку об'єкта в межах малої ділянки зображення. Але якщо об'єкт був відсутній на значній кількості кадрів, то, по-перше, необхідно виконувати пошук на всьому зображенні, а, по-друге, його масштаби перед зникненням і після появи можуть значно відрізнитись між собою, що значно збільшує обчислювальну складність пошуку. Наприклад, якщо припустити, що масштаби можуть відрізнитись в 6 разів, то  $N_s = |S| = 90$ , що практично виключає доцільність використання кореляційних фільтрів за таких умов довгострокового відстеження об'єкта.

Отримання карти відгуків для визначення масштабу може бути реалізоване також шляхом обчислення нормалізованих кореляцій подань зображень  $z_t$  і  $J_s$  з допомогою ознак. Це потребує менше операцій порівняно з використанням фільтра  $R_T$ , але може знизити точність визначення масштабу.

**Трекери на основі глибинного навчання на нейронних мережах** (глибинні трекери), які попередньо навчаються на великій кількості даних, демонструють порівняно високу надійність відстеження об'єктів. Однак, хоча глибинні трекери демонструють порівняно високу ефективність на відео з відомих баз даних (зокрема, VOT [20]), вони часто не підходять для середовищ з обмеженими обчислювальними ресурсами, таких як безпілотні літальні апарати (БПЛА). Один із напрямів виходу з таких ситуацій полягає у застосуванні полегшених варіантів глибинних трекерів [19], але завдяки зменшенню точності та надійності результатів відстеження.

Ідентифікація об'єктів різних розмірів на зображенні в глибинних трекерах часто виконується шляхом побудови та використання піраміди ознак, що поєднує геометричні та семантичні ознаки з різних шарів нейронної мережі. Основою для стандартного, але не завжди ефективного, рішення такої задачі є побудова піраміди ознак на піраміді зображень, тобто піраміди зображень з додаванням на кожному рівні відповідних ознак. Ці піраміди є інваріантними за

масштабом в тому сенсі, що дають змогу виявляти об'єкти у широкому діапазоні масштабів шляхом ковзного сканування їх моделей як за положеннями (координатами), так і за рівнями піраміди. Піраміди зображень з додаванням відповідних ознак і щільною дискретизацією масштабу широко використовувалися раніше в методах, що застосовували розроблені людиною ознаки. Наприклад, ознаки *HOG* [21] і *SIFT* [22] після щільного обчислювання по всіх пірамідах зображень використовувалися в численних роботах для класифікації зображень, виявлення об'єктів, оцінки пози людини тощо. Також виявлено значний інтерес до швидкого обчислення пірамід зображень з ознаками. Так, в [25] розглянуто алгоритм для швидкого обчислення пірамід на основі обчислення спочатку рідко дискретизованої (в масштабі) піраміди, а потім інтерполяції відсутніх рівнів.

З наступною появою глибоких згорткових мереж (*ConvNets*) [26] виявилось, що кількість рівнів у пірамідах ознак може бути зменшена, тому що *ConvNets* є більш стійкими до змін масштабу, але навіть з цією стійкістю багатомасштабне виявлення все ще працює краще порівняно з ознаками одного масштабу, особливо для малих об'єктів. Однак, збільшення рівнів піраміди зображень має очевидні обмеження внаслідок значного зростання часу виведення під час навчання, що робить цей підхід непрактичним для реальних застосувань. Більше того, мережі для глибокого навчання, що об'єднуються від початку до кінця на піраміді зображень, потребують надто значних затрат пам'яті, тому фактично такі піраміди можуть використовуватись лише під час тестування [27], що створює невідповідність між висновками під час навчання / тестування. З цих причин на основі досліджень [28] рекомендовано в *Fast/Faster R-CNN* використовувати ознаки, обчислені в одному масштабі, оскільки це є хорошим компромісом між точністю та швидкістю.

Крім піраміди зображень існують також інші способи обчислення багатомасштабного подання ознак. Глибока мережа обчислює ієрархію ознак шар за шаром, що має властиву багатомасштабну пірамідальну форму. Ця ієрархія ознак всередині мережі створює карти ознак з різною просторовою роздільною здатністю, але з тим недоліком, що різним рівням цієї піраміди відповідають різні можливості семантичного подання даних про зображення. Цей недолік може бути усуненим з допомогою алгоритму [29], результатом якого є піраміда ознак, яка має сильну семантику на всіх рівнях і швидко будується з одного вхідного масштабу зображення.

Основні алгоритми виявлення об'єктів, зокрема для відстеження, можна розділити на два типи: двоетапні та одноетапні. Двоетапні алгоритми виявлення (серія *R-CNN* [28]: *Faster R-CNN*, *Mask R-CNN*, *Cascade R-CNN*, *R-FCN*) спочатку генерують області-кандидати, а потім класифікують та регресують ці області. Ці алгоритми мають порівняно високу точність, особливо у виявленні малих об'єктів, але

вимагають генерації численних областей-кандидатів, що призводить до значної обчислювальної та часової складності.

Одноетапні алгоритми (серія *YOLO*, *SSD*, *RetinaNet*) розглядають виявлення об'єктів як загальну проблему регресії про їх місцезнаходження та розпізнавання. Серед них методи *YOLO* є наразі найбільш ефективними в галузі виявлення об'єктів, але як і інші поки не забезпечують достатньо надійний пошук малих за розмірами (менше  $32 \times 32$  пікселів) та багатомасштабних об'єктів. Ознаки отримуються в *YOLO* з вхідного зображення з допомогою кількох операцій згортки в небагатьох масштабах, кількість яких, наприклад, дорівнює трьом ( $80 \times 80$ ,  $40 \times 40$  і  $20 \times 20$ ) в *YOLOv8* [30]. Подальша побудова ефективної мережі піраміди ознак має визначальне значення для забезпечення ефективності багатомасштабного виявлення об'єктів.

**Визначення масштабу та кута повороту об'єкта на основі пошуку відповідних КТ на зображеннях.** В [6–8] на кожному  $t$ -му кадрі спочатку знаходиться сукупність  $p_A^t = \{p_i^t, p_i^1\}_{i=1}^{N_A}$  пар відповідних КТ, після чого обчислюються масштаб  $s_t$  і кут повороту  $\theta_t$  об'єкта за формулами:

$$s_t = med \left( \left\{ \frac{\|p_i^t - p_j^t\|}{\|p_i^1 - p_j^1\|} \right\}, i \neq j \right), \quad (6)$$

$$\theta_t = med \left( \left\{ a \tan 2(p_i^t - p_j^t) - a \tan 2(p_i^1 - p_j^1) \right\}, i \neq j \right), \quad (7)$$

де  $N_A$  – кількість пар відповідних КТ,  $med$  – медіана,  $p_i^t$  –  $i$ -та КТ на поточному кадрі і  $p_i^1$  – КТ на першому кадрі, що є відповідною до  $p_i^t$ .

Пошук відповідних КТ і обчислення (6, 7) виконуються з використанням відповідних КТ об'єкта без врахування КТ фону, що забезпечує високу швидкість відстеження, але може призводити до зниження як точності значень  $s_t$  і  $\theta_t$ , так і надійності відстеження, особливо якщо об'єкт має малу кількість КТ і може зникати на тривалий час з поля зору камери. Крім того, обчислення  $s_t$  і  $\theta_t$  як медіанних значень за (6, 7) може забезпечити дійсні дані, тільки якщо кількість  $p_{Atrue}^t$  правильно знайдених пар відповідних КТ більше кількості помилкових пар  $-p_{Atrue}^t > N_A * 0,5$ .

## Детектування та опис *BRISK* КТ на зображеннях

Відомо кілька алгоритмів визначення КТ і локальних інформативних областей в околі цих точок, кожному з яких відповідає певний тип КТ і спосіб опису областей. Цей опис має бути інформативним і, бажано, інваріантним до різних перетворень зображення, зокрема

до зміщення, повороту та масштабування, для пошуку відповідності КТ на зображеннях.

В [23] показано, що найбільшу точність мають *SIFT* КТ, але потребують значних обчислювальних затрат. Внаслідок цього при вирішенні багатьох задач активно використовуються *BRISK* (*Binary Robust Invariant Scalable Keypoints*) КТ [22]. Масштаб цих КТ визначається під час детектування шляхом застосування піраміди масштабованих представлень зображення. Після цього в околі КТ з розміром, відповідним знайденому масштабу, обираються 60 точок напівтонового зображення, які рівномірно розташовані на концентричних колах з центром у КТ, і на основі локальних градієнтів яскравості в цих точках визначається кут повороту КТ. На заключному етапі обчислюється бінарний дескриптор КТ в результаті порівняння яскравості в 512 парax точок в околі, який є 512-м бітовим числом. Таке бінарне подання забезпечує подальше швидке обчислення відстані Хемінга (кількості відповідних бітів з різними значеннями) між кожними двома дескрипторами з допомогою поширених *SSE* інструкцій, а також пошук відповідності між КТ на зображеннях. Дескриптори *BRISK* КТ є інваріантними до повороту та зміни масштабу на зображеннях.

### Модель об'єкта

Модель  $M = T \cup B$  об'єкта складається з множини  $T$  ключових точок на зображенні об'єкта, а також множини  $B$  ключових точок навколо цього об'єкта:

$$T = \{(d_i^T, p_i^T)\}_{i=1}^{N_T}, B = \{(d_i^B, p_i^B)\}_{i=1}^{N_B}, \quad (8)$$

де  $d_i^T (d_i^B) \in Z^{512}$  – 512-вимірний бінарний дескриптор *BRISK* КТ об'єкта (фону);  $p_i^T (p_i^B) \in R^2$  – відповідні координати КТ на зображенні.

Модель об'єкта  $M$  формується після виділення на початковому кадрі  $I_1$  мінімального обмежувального об'єкт прямокутника  $R$  на цьому кадрі. Кожна знайдена в межах  $R$  точка вважається належною до КТ об'єкта, якщо відстань дескриптора цієї КТ до множини дескрипторів КТ навколишнього фону більше заданого порогового значення. Інші КТ в межах  $R$ , а також певна кількість відібраних в околі  $R$  належать до КТ фону в  $M$ .

На відміну від [6] у  $M$  використовуються не тільки КТ об'єкта, а і фону, що дає змогу: 1) виконувати більш точний пошук відповідних КТ на кожному кадрі  $I_i$ ; 2) надійніше порівняно з [6] визначати масштаб та кут повороту об'єкта на  $I_i$ ; 3) відновлювати пошук об'єкта після тривалого зникнення з поля зору і появи знову у відео з можливими значними змінами його масштабу та кута повороту.

## Пошук КТ, відповідних до моделі об'єкта на зображеннях

Пошук на кожному кадрі  $I_t$  КТ, відповідних до КТ у  $M$ , відбувається шляхом виконання таких трьох етапів. На першому етапі визначається зміщення на поточному кадрі  $I_t$  знайдених відповідних до моделі КТ на попередньому  $I_{t-1}$  кадрі шляхом обчислення розрідженого оптичного потоку від  $I_{t-1}$  до  $I_t$  [33]. Це зміщення визначається достатньо точно, якщо рух об'єкта у відео є порівняно стабільним і повільним. Для підвищення надійності далі може бути виконана додаткова перевірка знайдених КТ на  $I_t$  через визначення їх положення на попередньому кадрі  $I_{t-1}$  шляхом застосування [33] для обчислення зворотного оптичного потоку від  $I_t$  до  $I_{t-1}$  [6–9].

Описані умови для локального пошуку відповідних КТ не завжди задовольняються, тому на другому етапі виконується так званий «глобальний» пошук КТ, відповідних до КТ у  $M$ , на основі обчислення відстані між дескрипторами по евклідовій метриці, що має відмінності від [6–8]. Спочатку для кожної КТ  $p_i^t$  на  $I_t$  знаходиться перелік із  $m$  КТ у  $M$ , які є найближчими по відстані між дескрипторами до  $p_i^t$  і упорядковані за зменшенням цієї відстані:  $\{p_i, n_i, k_i, d_i\}_{i=1}^m$ , де  $p_i, n_i, k_i, d_i$  – відповідно координати, ідентифікатор, клас ( $O$  – об'єкт,  $B$  – фон) і відстань  $i$ -ї точки у переліку до  $p_i^t$ , а  $p_{i_0}, n_{i_0}, k_{i_0}, d_{i_0}$  – подібні дані про КТ у  $M$ , що є найближчою до  $p_i^t$  за відстанню між дескрипторами і належить об'єкту або фону. При цьому зазвичай,  $m = 2$  і якщо виконуються умови  $k_0 = O, d_0 < T_1^O$  і  $d_0 / d_1 < T_2^O$ , то для точки  $p_i^t$  на  $I_t$  відповідною є КТ об'єкта у моделі з ідентифікатором  $n_0$ . Інакше, якщо виконуються умови:  $k_0 = k_1 = B, d_0 < T_1^B$  і  $d_0 / d_1 < T_2^B$ , тоді відповідною для  $p_i^t$  буде КТ фону з порядковим номером  $n_0$  у  $M$ .

У наведених умовах застосовуються 4 порогові значення для прийняття рішень про відповідність  $p_i^t$  до КТ об'єкта  $(T_1^O, T_2^O)$  або фону  $(T_1^B, T_2^B)$  у  $M$ . Після завершення глобального пошуку відповідних КТ визначаються координати центральної точки об'єкта з допомогою алгоритма кластеризації [7].

На третьому етапі для кожної  $p_i^t$  на  $I_t$  виконується локальний пошук відповідної КТ у моделі об'єкта  $M$  у такий спосіб [6–8]. Спочатку обчислюється проєкція  $pr_i^t$  на сукупність КТ у  $M$  за формулою:

$$pr_i^t = H_t^{-1}(p_i^t - c_t) + c_{t1}, \quad (9)$$

де  $H_t^{-1}$  – зворотне перетворення з попередньо визначеними значеннями масштабу та повороту відносно визначеного центра об'єкта  $c_t$  на  $I_t$ ;  $c_{t1}$  – центральна точка об'єкта на зображенні  $I_{t1}$ , яке використовувалось для створення ( $I_{t1} = I_1$ ) або оновлення  $M$ .

Після цього визначається сукупність КТ у  $M$ , що є близькими за значенням координат з точністю до порогового значення до проєкції  $pr_i^t$ .

Далі серед КТ у цій сукупності знаходиться найближча  $p_j^{dm}$  до  $p_i^t$  за відстанню  $d$  між дескрипторами  $i$ , якщо  $d(p_j^{dm}, p_i^t) < T_1^O$ , тоді  $p_j^{dm}$  вважається відповідною до  $p_i^t$ .

### Визначення масштабу та кута повороту об'єкта на основі пошуку відповідних КТ

Результатом пошуку відповідності КТ на поточному кадрі  $I_t$  до моделі об'єкта  $M$  є сукупність  $p_A^t = \{p_i^t, p_i^M\}_{i=1}^{N_A}$ , що складається із  $N_A$  пар відповідних КТ, де  $p_i^t$  –  $i$ -та КТ на  $I_t$ , а  $p_i^M$  – відповідна їй точка (об'єкта або фону) у  $M$ .  $M$  є сукупністю КТ об'єкта та фону, і при визначенні  $s_t$  та  $\theta_t$  за (6, 7) обчислюються не по одному, а по два значення – обчисленні першого використовуються КТ об'єкта у  $M$ , а другого – КТ фону у цій моделі. Таким чином, під час обчислення не використовуються пари КТ у  $M$ , одна з яких належить об'єкту, а друга – фону, тому що довжина відрізка лінії з такими кінцевими точками може змінюватись в процесі руху об'єкта і не відповідати дійсному значенню масштабу. Після цього з обчислених двох значень як вихідне використовується те, що менш відрізняється від відповідного середнього значення, обчисленого на останніх кількох кадрах.

Було виявлено, що обчислення масштабу та кута повороту на основі відповідних КТ фону є більш точним порівняно з КТ об'єкта внаслідок того, що, по-перше, кількість КТ фону зазвичай значно більше, ніж об'єкта і, по-друге, КТ фону розташовані на більших відстанях одна від одної, що знижує вплив помилок у визначенні положення КТ на результат оцінки масштабу та кута повороту.

Масштаб та кут повороту, обчислені за формулами (6, 7), є близькими до дійсних за малих змін фону або частого оновлення та адаптації КТ фону до більших змін, наприклад, внаслідок розмиття. Якщо ж ці умови не виконуються, то для надійнішого визначення вказаних параметрів доцільніше використовувати такий евристичний алгоритм.

Результатом роботи алгоритму є оцінені значення  $s_t$  та  $\theta_t$  або ж нульове значення  $s_t$  для свідчення того, що вхідні дані про відповідні КТ є недостатньо надійними і містять значну кількість помилок. На початковому етапі алгоритму формується зображення, яке є результатом об'єднання по вертикалі двох кадрів:  $I_{t1}$  і поточного  $I_t$  у відео (Рис. 2, 3), номери яких показано у лівому верхньому куті на цих кадрах. Далі формується сукупність  $L$  відрізків ліній, кожна з яких з'єднує КТ у моделі об'єкта на  $I_{t1}$  з відповідною КТ на  $I_t$ , що показані зліва червоним кольором на Рис. 2(a)–Рис. 3(a). Після цього обчислюються медіанні значення довжини та кута повороту відрізків ліній  $L$  і обчислюється кількість відрізків, що мають близькі довжину та кут повороту до обчислених медіанних значень і показані справа на Рис. 2 (b)–Рис. 3 (b).

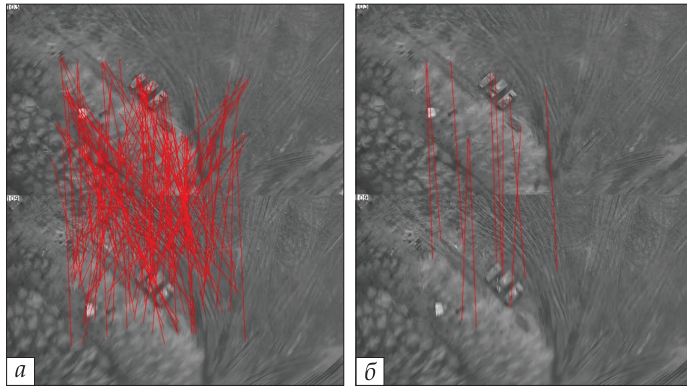


Рис. 2. Приклад визначених помилковими даних (а) відповідності КТ фону, яким відповідає мала кількість відібраних більш надійних пар відповідних КТ (б)

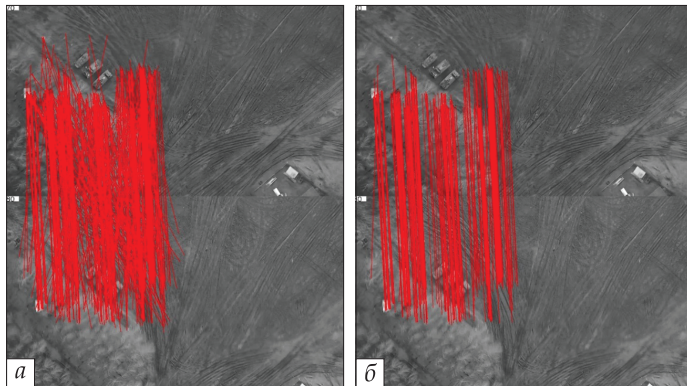


Рис. 3. Приклад вхідних даних (а) про відповідність КТ фону на порівнюваних кадрах 103 і 109, на основі яких визначається достатня кількість відібраних пар КТ (б) для подальшого обчислення масштабу та кута повороту на 109-му кадрі за медіанними значеннями

Якщо кількість цих порівняно надійних відрізків ліній є малою частиною від  $|L|$ , то алгоритм видає нульове значення  $s_r$ , що свідчить про порівняно малу надійність даних відповідності КТ на вході алгоритму (Рис. 2). Це означає, що поточний кадр у відео не може бути використано для оцінки масштабу внаслідок вчасно не виконаного оновлення моделі об'єкта або ж недоліків кадра, пов'язаних, наприклад, зі зміною умов освітлення або розмиттям через втрату фокусу чи швидкого пересування.

В іншому разі (Рис. 3) сукупність відібраних і порівняно надійних відрізків ліній використовується для обчислення медіанних значень масштабу та кута повороту за формулами, подібними до (6, 7). У наведеному прикладі на Рис. 3 кількість відрізків, відібраних і показаних на Рис. 3(б) менше половини числа  $|L|$  вхідних відрізків на Рис. 2(а). Це означає, що обчислений масштаб за медіанним значенням відповідних вхідних даних на Рис. 3(а) відрізнятиметься від

дійсного значення на 109-му кадрі у відео з причини значної кількості помилок під час пошуку відповідності КТ на порівнюваних кадрах 103 і 109.

## Оновлення моделі об'єкта у відео

Хай  $N_t^A$  — кількість КТ на  $I_t$ , відповідних до КТ об'єкта у  $M$ ;  $N_T, N_R$  — загальні кількості КТ об'єкта у  $M$  і в межах  $R$  на  $I_t$ ;  $N_{KT} = N_T * k_T + N_R * k_R$  — зважена сума, де  $k_T, k_R$  можуть дорівнювати 0,6 і 0,4;  $Thr_D = N_{KT} * k_D$ ,  $Thr_U = N_{KT} * k_U$  — порогові значення для застосування в умовах детектування об'єкта і оновлення моделі  $M$ , де  $k_D, k_U$  за замовченням дорівнюють 0,15 і 0,3. Якщо  $N_t^A > Thr_D$ , то об'єкт вважається присутнім на поточному зображенні і обмежувальний прямокутник  $R$  може бути визначено шляхом застосування обчислених значень центру, масштабу та кута повороту об'єкта.

Якщо у відео є значні зміни у поданні об'єкта та фону на зображеннях, необхідно адаптувати до них  $M$  шляхом оновлення як кількості, так і дескрипторів КТ об'єкта та фону у цій моделі. Але ці зміни супроводжує ризик надлишкового пристосування до фону (дріфту), внаслідок чого може відбутись втрата об'єкта. Тому оновлення  $M$  відбувається за виконання порівняно надійних умов визначення положення об'єкта або його відсутності на зображеннях. Будемо відрізняти два способи оновлення  $M$ , після задіяння кожного з них на  $t$ -му кадрі  $t_1 = t$ .

Перший спосіб застосовується за виконання таких умов детектування об'єкта на кожному  $I_t$ : 1)  $N_t^A > Thr_U$  &  $s_t > 0$  і 2) не менше 75-и %  $R$  знаходиться на  $I_t$ . В процесі оновлення  $M$  формується із відповідних КТ об'єкта та фону, і якщо їх мало, то додатково з КТ, близьких за значеннями відстаней між дескрипторами до КТ об'єкта або фону в  $M$  у двох околах визначеного положення об'єкта.

Другий спосіб використовується, якщо об'єкт протягом певного часу відсутній на кадрах у відео. Впродовж цього часу на кожному  $I_t$  виконується пошук КТ фону, які є відповідними до КТ фону у  $M$ , і визначаються змінені значення масштабу і кута повороту відносно  $I_{t1}$ . На кожному  $I_t$  виконується також оновлення КТ фону в  $M$  (для надійнішого пошуку відповідних КТ фону на наступних зображеннях) за виконання таких умов:  $N_t^A \leq Thr_D$  |  $s_t = 0$ . Для цього формується перелік з КТ на  $I_t$ , відповідних до КТ фону в  $M$ , і (якщо їх замало) додатково з КТ в межах ділянки на  $I_t$ , центр якої збігається з центром попереднього положення об'єкта, а розміри є тим більшими, чим довшим є час відсутності об'єкта. Далі після обчислення нових дескрипторів ці КТ використовуються як КТ фону в  $M$ . Після оновлення КТ фону додатково оновлюються також КТ об'єкта в  $M$ , якщо виконуються умови:  $S_t > 0$  &  $(|s_t - s_{t1}| > thr_{sc} \vee |\theta_t - \theta_{t1}| > thr_\theta)$ , де  $thr_{sc}$  і  $thr_\theta$  — порогові значення. Це оновлення відбувається шляхом таких дій:

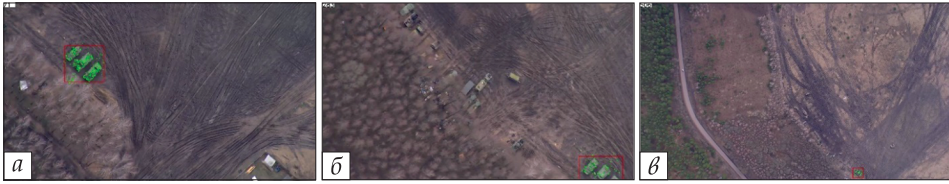


Рис. 4. Приклади детектування об'єкта під час відстеження у відео на кадрах: початковому 71-му (а), 283-му (б) перед подальшим тривалим зникненням (на кадрах з 284-го по 505-й) з поля зору і на 506-му (в) з появою об'єкта у відео із зменшеним у 6 разів масштабом

1) масштабування та поворот  $I_{it}$  за масштабом та кутом повороту, визначених на  $I_{it}$ , і 2) детектування КТ в межах обмежувального об'єкта прямокутника на трансформованому зображенні  $I_{it}$  з подальшим застосуванням їх як оновлених КТ об'єкта в моделі  $M$ .

На Рис. 4 показано приклади, коли визначають положення об'єкта в відео обмежувальним прямокутником, розробленими засобами, на 3х кадрах в одному з відео: оператор на 71-му (рис. 4 (а)) і програма на 283-му (рис. 4 (б)) перед тривалим (з 284-го по 505-й кадри) зникненням об'єкта з поля зору, і з його появою у відео на 506-му кадрі (рис. 4 (в)) зі зменшеним в 6 разів масштабом. На кожному з 71-го по 506-й кадрів обчислювались поточні значення масштабу та кута повороту об'єкта, у тому числі за відсутності об'єкта в полі зору камери, а також виконувалось оновлення моделі  $M$  на деяких з них за описаних умов, що забезпечило детектування об'єкта з його появою у відео на 506-му і наступних кадрах зі значно зміненими параметрами подання на зображеннях порівняно із 283-м кадром.

## Висновки

У роботі використовується модель  $M$  об'єкта відстеження, що на відміну від [6] складається з КТ не тільки об'єкта, а і фону для пошуку відповідності КТ на кожному зображенні до  $M$ , і визначення змін масштабу та кута повороту об'єкта як за наявності на зображеннях, так і після його зникнення та подальшої появи у відео зі зміненими параметрами.

Розроблено алгоритм визначення змін масштабу та кута повороту об'єкта у відео на основі відповідних КТ об'єкта і фону за наявності значної кількості помилок у знайденій відповідності КТ на порівнюваних зображеннях. Запропоновано спосіб визначення масштабу та кута повороту зображень у відео за відсутності об'єкта на цих зображеннях з метою оновлення моделі об'єкта і його детектування після появи на зображеннях із суттєво зміненими значеннями цих параметрів.

## ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Bolme D.S., Beveridge J.R., Draper B.A., Lui Y.M.. Visual object tracking using adaptive correlation filters. *The IEEE conference on Computer Vision and Pattern*, 2010, 1–10. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2010.5539960>
2. Henriques J.F., Caseiro R., Martins P., Batista J. High-speed tracking with kernelized correlation filters. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2015, Vol. 37 (3), 583–596. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2014.2345390>
3. Danelljan M., Häger G., Khan F.S., Felsberg M. Discriminative scale space tracking. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2016, Vol. 39 (8), 1561–1575. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2016.2609928>
4. Tao R., Gavves E., Smeulders A.W. Siamese Instance Search for Tracking. *The IEEE conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, 1420–1429. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.158>
5. Bertinetto L., Valmadre J., Henriques J.F., Vedaldi A., Torr P.H. Fully-convolutional siamese networks for object tracking. *Computer vision–ECCV 2016 workshops*, Amsterdam, the Netherlands, 2016, 850–865. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.158>
6. Nebelha G., Pflugfelder R.P. Clustering of static-adaptive correspondences for deformable object tracking. *The IEEE conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2015, 2784–2791. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7298895>
7. Wu B., Xie Y., Luo W. Robust and adaptive object tracking via correspondence clustering. *IEICE Trans. Information & Systems*, 2016, Vol. E99-D (10), 2664–2667. <https://doi.org/10.1587/transinf.2016EDL8065>
8. Hong Z., Chen Z., Wang C., Mei X., Prokhorov D., Tao D. Multi-store tracker (muster): A cognitive psychology inspired approach to object tracking. *The IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2015, 749–758. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7298675>
9. Kalal Z., Mikolajczyk K., Matas J. Tracking-learning detection. *TPAMI*, 2012, Vol. 34 (7), 1409–1422. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2011.239>
10. Ma C., Yang X., Zhang C., Yang M.H. Long-term correlation tracking. *The IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2015, 5388–5396. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7299177>
11. Ma C., Huang J.B., Yang X., Yang M.H. Adaptive correlation filters with long-term and short-term memory for object tracking. *International Journal of Computer Vision*, 2018, Vol. 126, 771–796. <https://doi.org/10.1007/s11263-018-1076-4>
12. Lukežič A., Zajc L.Č., Vojšir T., Matas J., Kristan M. FuCoLot—a fully-correlational long-term tracker. *Computer Vision–ACCV 2018: 14th Asian Conference on Computer Vision, Perth, Australia*, 2018, Revised Selected Papers, Part II 14, 2019, 595–611. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-20890-5\\_38](https://doi.org/10.1007/978-3-030-20890-5_38)
13. Lukežič A., Vojšir T., Čehovin Zajc L., Matas J., Kristan M. Discriminative correlation filter with channel and spatial reliability. *Comp. Vis. Patt. Recognition*, 2017, 6309–6318. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.515>
14. Yan B., Zhao H., Wang D., Lu H., Yang X. ‘Skimming-Perusal’ Tracking: a framework for Real-Time and robust Long-Term tracking. *IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2019. <https://doi.org/10.1109/iccv.2019.00247>
15. Huang L., Zhao X., Huang K. GlobalTrack: a simple and strong baseline for Long-Term tracking. *AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2020, Vol. 34 (07), 11037–11044. <https://doi.org/10.1609/aaai.v34i07.6758>
16. Dai K., Zhang Y., Wang D., Li J., Lu H., Yang X. High-Performance Long-Term tracking with Meta-Updater. *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2020, 6297–6306. <https://doi.org/10.1109/cvpr42600.2020.00633>
17. Dunnhofer M., Micheloni C. CoCoLoT: Combining Complementary Trackers in Long-Term Visual Tracking. *26th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, 2022, 5132–5139. <https://doi.org/10.1109/ICPR56361.2022.9956082>

18. Chen X., Yan B., Zhu J., Wang D., Yang X., Lu H. Transformer Tracking. *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2021, 8122–8131. <https://doi.org/10.1109/CVPR46437.2021.00803>
19. Swati, Kumar V.N., Dinesh Kawa S., Engineer P.J. An Efficient Object Tracking on Edge Devices with Quantized Siamese Networks. *Devices for Integrated Circuit (DevIC)*, 2025, 604–609. <https://doi.org/10.1109/DevIC63749.2025.11012629>
20. Kristan M., Matas J., Leonardis A., Vojir T., Pflugfelder R.P., Fernandez G.J., Nebeha, G., Porikli F.M., Cehovin L. A Novel Performance Evaluation Methodology for Single-Target Trackers. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2015, Vol. 38, 2137–2155. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2016.2516982>
21. Dalal N., Triggs B. Histograms of oriented gradients for human detection. *Comp. Vis. Patt. Recognition*, 2005, Vol. 1, 886–893. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2005.177>
22. Lowe D.G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *IJCV*, 2004, Vol. 60 (2), 91–110. <https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>
23. Danelljan M., Hager G., Khan F.S., Felsberg M. Accurate Scale Estimation for Robust Visual Tracking. *BMVC*, 2014, 1–11. <http://doi.org/10.5244/C.28.65>
24. Li Y., Zhu J. A scale adaptive kernel correlation filter tracker with feature integration. *Proc. European Conf. Computer Vision*. 2014, 254–265. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-16181-5\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16181-5_18)
25. Dollár P., Appel R., Belongie S., Perona P. Fast feature pyramids for object detection. *TPAMI*, 2014. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2014.2300479>
26. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *NIPS*, 2012, 84–90. <https://doi.org/10.1145/3065386>
27. Shrivastava A., Gupta A., Girshick R. Training region- based object detectors with online hard example mining. *IEEE conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016, 761–769. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.89>
28. Ren S., He K., Girshick R., Sun J. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks. In *NIPS*, 2015, 91–99.
29. Lin T.-Y. *et al.* Feature pyramid networks for object detection. *IEEE conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2017, 2117–2125. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.106>
30. Zhou S., Zhou H., Qian L. A multi-scale small object detection algorithm SMA-YOLO for UAV remote sensing images. *Sci Rep*, 2025, Vol. 15, Article 9255. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92344-7>
31. Leutenegger S., Chli M., Siegwart R.Y. BRISK: Binary robust invariant scalable keypoints. In *ICCV*, 2011. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2011.6126542>
32. Mikolajczyk K., Schmid C. A performance evaluation of local descriptors. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)*, 2005, Vol. 27, 1115–1125. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2005.188>
33. Lucas B.D., Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. In *IJCAI*, 1981, 674–679. URL: <https://www.ijcai.org/Proceedings/81-2/Papers/017.pdf> [Accessed 03 Oct. 2025]

Отримано / Received 30.10.2025

M. KYKYO, PhD (Engineering), Senior Researcher, Leading Researcher, Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine, 40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine  
<https://orcid.org/0009-0005-6605-0339>  
vkiiko@gmail.com

#### DETERMINING THE SCALE AND ROTATION ANGLE FOR LONG-TERM OBJECT TRACKING IN VIDEO

**Introduction.** The task of tracking is to determine the position of an arbitrary object (target) in a video after detection in the initial frame. Algorithms for performing tracking are divided into those that provide short-term or more complex long-term

tracking in a video. A key problem in long-term tracking is the recovery of a target after a period of absence or tracking failures, because during this time not only the coordinates but also the scale and angle of rotation of the target can change significantly, knowledge of which increases the accuracy and reliability of detection. As a result, after a long disappearance, the search for the target must be performed not locally, but within the entire image and significant intervals of possible changes in scale and rotation angle. The reliability of tracking in video largely depends on the efficiency (accuracy and low computational complexity) of the algorithms used to determine the scale and rotation angle of the tracked target in the images. There are known algorithms that determine the scale and rotation angle based on the correspondence of key points (KPs) of the target without sufficient consideration of the background KP, and can provide tracking in conditions of only a short-term absence of the target, during which the scale and rotation angle change little.

**Purpose** of the research is to develop an algorithm for determining the scale and angle of rotation of an object, which overcomes these shortcomings to obtain more reliable object tracking results in difficult conditions.

**Methods** for searching key points and determining their correspondence in images were used.

**Results.** An algorithm is proposed for estimation the scale and rotation angle of the tracked object in the images based on finding corresponding KPs in each frame to the KPs in the object model  $M$ . The algorithm can be mainly used in conditions where changes in scale and angle of rotation are mainly a consequence of changes in camera movement or operator actions. These changes are largely correlated with changes in the background, which usually corresponds to video surveillance from an aircraft, in particular a UAV. The advantages of the algorithm are that it is relatively more resistant to errors in determining the corresponding KP pairs, and can also be used during the prolonged absence of an object in the video to estimate the scale and angle of rotation.

**Conclusions.** The paper uses a tracking object model consisting of KPs in the object and the background to search for KPs correspondence. The algorithm is proposed for determining the scale and rotation angle of the object both when present and absent in images to update  $M$  and detect this object after it appears in images with significantly changed parameters. Examples of using the algorithm for long-term tracking with the proposed criterion for the presence of the object, as well as two methods of updating  $M$ , when it is present or absent in images, are given.

**Keywords:** *object tracking in video, BRISK key points, KCF tracking algorithm, HOG features, scale and rotation angle of an object in an image, object detection and recognition.*

---

# INTELLECTUAL INFORMATION TECHNOLOGIES

## ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<https://doi.org/10.15407/intechsys.2025.05.039>  
UDC 004:621.391

**M.V. SYTNYK**, Master's Student,  
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",  
37, Beresteysky Ave., Kyiv, 03056, Ukraine  
<https://orcid.org/0009-0003-3931-7312>  
makspro1139@gmail.com

**H.A. PIDNEBESNA**, PhD (Engineering), Senior Lecturer,  
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",  
37, Beresteysky Ave., Kyiv, 03056, Ukraine  
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,  
40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-5735-9861>  
pidnebesna@ukr.net

### OPTIMIZATION OF MULTI-CRITERIA SELECTION OF COMPUTER COMPONENTS BASED ON HIERARCHY ANALYSIS

---

*The paper addresses the problem of optimal selection of components for personal computers in healthcare facilities under conditions of limited budget and multiple evaluation criteria. It is determined that traditional methods of component selection based on empirical experience or simple comparison of characteristics are insufficiently effective for making optimal decisions in multi-criteria choice situations. The application of Thomas Saaty's adapted Analytical Hierarchy Process as an effective tool for mathematically grounded multi-criteria component selection is substantiated, taking into account technical compatibility, energy balance, and user priorities. Specific examples of applying the method when choosing a processor for a healthcare facility are provided, demonstrating four scenarios with different parameter priorities and three optimization modes. Experimental validation confirmed high algorithm accuracy in tracking user-defined priorities. An economic efficiency analysis of the developed system application has been conducted, demonstrating potential savings of up to 25% of the IT budget for healthcare institutions while maintaining the required performance level.*

**Keywords:** *analytical hierarchy process, multi-criteria selection, component selection, healthcare facilities, dynamic parameter balancing, decision optimization, IT infrastructure.*

---

Cite: Sytnyk M.V., Pidnebesna H.A. Optimization of Multi-Criteria Selection of Computer Components Based on Hierarchy Analysis. *Information Technologies and Systems*, Kyiv, 2025, Vol. 5 (5), 39–50. <https://doi.org/10.15407/intechsys.2025.05.039>

© Publisher PH "Akademperiodyka" of the NAS of Ukraine, 2025. The article is published under an open access license CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

## Problem Statement

Modern healthcare institutions increasingly rely on effective IT support for the operation of medical information systems, electronic patient documentation, and automation of administrative processes. According to the Ministry of Health of Ukraine, by 2024, over 85% of primary healthcare institutions will require computer modernization, while the average IT budget per institution is only \$15.000–25.000 per year.

The computer market is characterized by an exponential growth in the range of components, the complexity of their interactions, and a variety of quality assessment criteria. According to analytical agencies, by 2024, the processor market will include over 500 current models, over 800 motherboards, and over 1.000 RAM module variants. This diversity makes it difficult for even experienced IT professionals to select the optimal configuration.

The problem is complicated by the need to consider multiple inter-related factors. First, there's the technical compatibility of components: the processor must match the motherboard socket, the RAM must match the supported type (DDR4 or DDR5), and the graphics card must match the available PCIe slots and case dimensions. Second, there's the system's energy balance: the combined power consumption of all components must exceed the power supply's capacity, taking into account the recommended 20–40% reserve. Third, there are physical constraints: the height of the processor cooling system must fit within the case's interior, and the length of the graphics card must fit within the available space. Fourth, there are the varying priorities of users—from minimizing costs to maximizing performance for specific medical applications.

Traditional component selection methods based on empirical experience or simple comparisons of characteristics are ineffective for making optimal decisions in a multi-criteria environment. For medical institutions, which often operate within limited budgets and require standardized IT infrastructure, the need for a scientifically based approach to equipment selection is especially critical. According to the Drabivka Primary Health Care Center, a non-optimal configuration can lead to budget overruns of 20–35% or the purchase of underperforming equipment, requiring premature upgrades after 2–3 years instead of the planned 5–7 years of operation.

Therefore, the development of an intelligent decision support system that combines mathematically sound multi-criteria analysis with automated compatibility checking and the ability to flexibly configure priorities is relevant.

The purpose of this article is to highlight the specifics of adapting the Saaty hierarchy process to the problem of multi-criteria selection of computer components and to demonstrate its practical application in the context of optimizing IT costs in medical institutions, taking into account technical compatibility, energy balance, and dynamic balancing of user priorities.

## Analysis of Recent Research and Publications

The mathematical basis for the implementation of the multi-criteria component selection system was the Saaty hierarchy analysis method. The fundamental work is the study of T.L. Saaty "The Analytic Hierarchy Process" (1980) [1], in which the author first systematized the hierarchy analysis method as a tool for revealing and taking into account the hierarchical structure of criteria in the process of making complex decisions.

Various aspects of the application of the method in the context of IT solutions and multi-criteria selection were studied by domestic and foreign scientists. In [2], the issues of transition from single-criteria to multi-criteria optimization are considered in detail and the shortcomings of direct linear convolution of criteria are critically analyzed and a comprehensive mathematical description of the method with specific computational algorithms is provided.

The feasibility of substantiating the use of expert evaluation methods when choosing between alternatives and the practical application of the Saaty hierarchy analysis method are given in [5, 6].

### Review of Existing Approaches to Component Selection

A thorough analysis of modern decision support systems in the field of computer system configuration has been conducted. As a result of this analysis, four main approaches can be distinguished:

**Parametric filtering approach** (Hotline.ua). Hotline.ua, a leading Ukrainian price aggregator, implements a classic parametric approach based on multi-level filtering of products by technical specifications. Users can combine filters by manufacturer, socket, number of cores, frequency, etc. The system offers a "Build a Computer" tool with a basic compatibility check.

*Advantages:* complete process transparency, flexible filtering, up-to-date pricing information.

*Disadvantages:* lack of intelligent analysis, incomplete compatibility check, passive role of the system, and the need for expert user knowledge.

**Expert-based recommendation approach** (BRAIN.com.ua). The Ukrainian online store BRAIN.com.ua implements the concept of "ready-made solutions" – pre-configured systems for various scenarios (office PC, gaming PC, workstation). The system offers a power calculator and warnings about potential bottlenecks.

*Advantages:* reduced entry point for inexperienced users, guaranteed compatibility in ready-made configurations, energy balance accounting.

*Disadvantages:* limited number of ready-made configurations, static expert recommendations, subjective classification.

**Crowdsourcing** (PCPartPicker). The international PCPartPicker platform implements the most comprehensive automated compatibility check: physical (graphics card length, cooler height), electrical (power supply wattage, connector availability), interface (memory type, PCIe version), and software (motherboard BIOS processor support).

*Advantages:* the most comprehensive compatibility check, price aggregation from 40+ stores, price history, database of 5+ million user configurations.

*Disadvantages:* passive role in decision making, lack of formalized multi-criteria analysis, potential errors with new components.

**Simplified Optimization** (Telemart.ua). The Ukrainian online store Telemart.ua is implementing a simplified version of multi-criteria optimization based on “usage profiles.” The user answers a questionnaire about the system’s purpose and priorities, after which the system generates 3–5 alternative configurations.

*Advantages:* active role of the system, consideration of individual priorities, automated selection.

*Disadvantages:* simplified optimization model, fixed weighting coefficients for profiles, non-transparent decision-making algorithm.

A comparative analysis of four existing approaches revealed common system limitations:

- the lack of formalized multi-criteria analysis;
- limited personalization;
- static evaluation criteria;
- and the passive role of the system in decision-making.

This justifies the need to develop an intelligent decision-making support system that combines the mathematically correct Saaty method

**Table 1. Sequential analysis of approaches to component selection**

Characteristic	Hotline.ua	BRAIN.com.ua	PCPartPicker	Telemart.ua	Developed system
Type of approach	Parametric filtering	Expert recommendations	Crowdsourcing with verification	Simplified optimization	Adapted Saaty method
Degree of automation	Low	Average	Average	High	Very high
Compatibility check	Basic	Extended	Comprehensive	Automatic	Complex + energy balance
Multi-criteria analysis	Missing	Missing	Missing	Simplified	Mathematically sound
Personalization	Missing	Limited	Missing	Profiles	Full + dynamic balancing
Saving configurations	No	No	Yes	No	Yes + crypto protection
Mathematical justification	None	None	None	Simplified	Saaty Method with Adaptation
Locking parameters	No	No	No	No	Yes
Optimization modes	No	Limited	No	Yes	3 modes + settings

with interactive weight control, dynamic parameter balancing, configuration storage mechanisms, and comprehensive validation of results. These functional requirements are implemented in the developed software application.

Table 1 summarizes the results of a comparative analysis of known approaches to component selection and the developed system.

The author's previous work [3] demonstrated the fundamental possibility of automating complex multi-criteria selection using the Saaty method, but revealed critical limitations: fixed weighting factors, lack of personalization and mechanisms for saving configurations.

## Main Results and Content of the Research

The classic analytic hierarchy process, proposed by T. Saaty in the 1970s, was adapted to the specifics of computer component selection, taking into account the specifics of the subject area. The main stages of the adapted method include structuring the problem, normalizing the data, constructing pairwise comparison matrices, and calculating local and global priorities.

### Stage 1. Structuring the Problem and Defining Criteria

Specific evaluation criteria are defined for each component category.

For processors, five parameters are identified:

- Price (minimized);
- Number of cores (maximized);
- Base clock frequency (maximized);
- Turbo frequency (maximized);
- TDP – thermal dissipation (minimized).

In total, the system implements ten independent balancers for different component groups: processors (5 parameters), cooling systems (4), motherboards (3), RAM (6), monitors (5), video cards (6), speakers (4), sound cards (5), headphones (2), and webcams (3).

### Stage 2. Normalization of Dissimilar Parameters

Since component parameters have different natures and units of measurement, they must be normalized to ensure comparability. A system for normalizing parameter values in the range from 0.1 to 0.9 was developed using the following formula:

$$norm\_value = 0,1 + 0,8 \times \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}.$$

For the parameters being minimized (price, energy consumption, noise level), inverse normalization is used:

$$inv\_value = 0,9 - norm\_value + 0,1.$$

### Stage 3. Construction of pairwise comparison matrices

For each parameter, a pairwise comparison matrix of alternatives of size  $N \times N$  is constructed, where  $N$  is the number of component variants.

The matrix element is calculated as:

$$a_{ij} = \text{norm\_value } i / \text{norm\_value } j.$$

The diagonal elements are equal to one. The matrix is inversely symmetric:  $1/a_{ij}$ .

*Stage 4. Calculating Local Priorities*

Local priorities are calculated using the geometric mean row of the matrix:

$$\text{geom\_average } i = \sqrt[N]{\prod_{j=1}^N a_{ij}}.$$

Using a logarithmic representation ensures numerical stability:

$$\log(\text{geom\_average } i) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \log(a_{ij}).$$

Normalization leads to the emergence of local priorities.

*Step 5. Calculating Global Priorities*

Global priorities are calculated using additive convolution:

$$G_i = \sum_{j=1}^M w_j \times L_{ij}.$$

where  $w_j$  is the weight of the  $j$ -th parameter,  $L$  is the local priority of the  $i$ -th alternative for the  $j$ -th parameter.

**Dynamic Parameter Balancing System**

The key innovation of the developed system is the dynamic balancing mechanism for weight coefficients via the ParameterBalancer class, which ensures:

- the constant sum of the parameters is 100% regardless of changes;
- ability to lock individual parameters to fix their values;
- automatic recalculation of unlocked parameters proportional to their current value;
- rounding error correction to ensure accurate sums.

The balancing algorithm consists of the following stages.

- Initialization: For  $M$  parameters, initial values are  $100/M$  percent each.
- Parameter change: when changing the parameter  $k$  to a new one, the remainder is determined:

$$\Delta = 100 - v_k^{new}.$$

- Blocked subtraction:

$$\Delta_{free} = \Delta - \sum_{i \in \text{block}} v_i.$$

- Proportional distribution:

$$V_i^{new} = \Delta_{free} \times \frac{v_i^{old}}{\sum_j v_j^{old}}, \text{ where } j \in \text{unblock}, j \neq k.$$

**Multi-level filtration system**

The processing method sequentially processes all component types with multi-stage filtering.

1. Filter by manufacturer: Intel, AMD or “All manufacturers”.
2. Filtering by graph: Checking for at least one variant (integrated or discrete).
3. Compatibility filtering:
  - Processor socket = motherboard socket;
  - The memory type (DDR4/DDR5) of the processor and the MP match;
  - The MP form factor matches the case;
  - Video card length ≤ case space.
4. Energy balance:  $\sum \text{Consumption} \times 1.4 \rightarrow$  Fuel selection.
5. Optimization modes:
  - “Economy”: bottom 33% or max 300 options;
  - “Balance”: 33-66 percentile or 300 options;
  - “Productivity”: top 33% or max 300 options.

Processing sequence: Processor → Motherboard → RAM → Cooling system → Video card → Case → Monitor → Storage devices → Peripherals → Power supply → UPS.

To demonstrate the method, let’s consider processor selection. The database contains 347 processor models.

Table 2 shows the numerical values of the evaluation of four different scenarios of such selection.

*Scenario 1:* Even distribution (20% each) → Intel Xeon E5-1650 V4 (6 cores, 4.0 GHz turbo, TDP 140 W, 28.51 USD). Total cost: 937.05 USD. A compromise solution with a balance of parameters.

*Scenario 2:* Price priority (100% price) → Intel Celeron E1600 (2 cores, 2.4 GHz, 14 USD). Total cost: 657.22 USD (-29.9%). Demonstrates the risk of extreme optimization: outdated processor from 2008, unsuitable for modern medical systems.

*Scenario 3:* Multithreading (49% cores + 51% turbo) → Intel Xeon E5-2650 V4 (12 cores, 2.9 GHz turbo, 74 USD). Total cost: 1008.72 USD (+7.6%). The number of cores has doubled, exactly matching the priority.

*Scenario 4:* Frequency + Efficiency (66% turbo + 19% base + 15% TDP) → Intel Core i5-10105F (4 cores, 3.7/4.4 GHz, TDP 65 W, 81.16 USD).

**Table 2. Numerical priority estimates for four processor selection scenarios**

Parameter	Scenario 1 (Balance)	Scenario 2 (Price)	Scenario 3 (Core+Frequency)	Scenario 4 (Frequency+TDP)
Price (%)	20	100	0	0
Number of cores (%)	20	0	49	0
Base frequency (%)	20	0	0	19
Turbo frequency (%)	20	0	51	66
TDP (%)	20	0	0	15

Total cost: 734.91 USD (-21.6%). Highest frequency (4.4 GHz) at lowest TDP (65 W), modern platform from 2021.

Table 3 summarizes the different scenarios.

To evaluate system performance in different price segments, testing was conducted with the same priorities (20% balance) but different modes. Table 4 shows a comparative analysis for the three optimization modes.

## Discussion of Results

The study revealed the following advantages and disadvantages of the implemented approach. Experimental testing confirmed the following advantages of the adapted method:

- Precise priority matching: the system selected components that best matched the weighting coefficients. The price-priority scenario selected the cheapest processor (\$14), the core-priority scenario selected a 12-core processor, and the frequency-priority scenario selected a 4.4 GHz processor.

- Flexibility: the ability to interactively change priorities in real time with automatic recalculation of results within 0.5-1.5 seconds.

- Mathematical validity: The Saaty method ensures correct selection, unlike empirical approaches. The consistency index of all matrices did not exceed 5.4%, with a standard of <10%.

- Multi-level validation: the system checks 15+ compatibility parameters before launch, eliminating technically impossible configurations. Configuration preservation: Fernet AES-128 cryptographic protection with PBKDF2HMAC (100,000 iterations) ensures the security of your settings.

**Table 3. Comparative analysis of the results of the four scenarios**

Parameter	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
Processor model	Xeon E5-1650 V4	Celeron E1600	Xeon E5-2650 V4	Core i5-10105F
Year of release	2016	2008	2016	2021
Cores / Threads	6 / 12	2 / 2	12 / 24	4 / 8
Turbo frequency (GHz)	4.0	2.4	2.9	4.4
TDP (W)	140	65	105	65
Processor price (\$)	28.51	14.00	74.00	81.16
Total cost (\$)	937.05	657.22	1008.72	734.91
Deviation from baseline	0%	-29.9%	+7.6%	-21.6%
Multitasking	High	Very low	Very high	High
Performance per core	High	Very low	Medium	Very high
Energy efficiency	Low	High	Medium	High
Relevance of the platform	Outdated	Critically outdated	Outdated	Modern
Suitability for medical systems	Acceptable	Unsuitable	Excessive	Optimal

Table 4. Comparative analysis of three optimization modes

General characteristics	Parameter		
	Saving	Balance	Productivity
Price segment	Bottom 33%	33-66%	Top 33%
Total cost (\$)	612.49	1045.49	3084.44
Correlation	1.0×	1.7×	5.0×
<b>PROCESSOR</b>			
Model	Intel Core i5-7320	AMD Ryzen 5 7600	Intel Core i9-14900
Generation	7th (Kaby Lake)	Zen 4 (2023)	14th (Raptor Lake)
Cores / Threads	4 / 4	6 / 12	24 / 32
Maximum frequency ( GHz )	3.6	5.1	5.8
TDP (W)	65	65	219
Price (\$)	72.80	189.99	567.72
Budget share	11.9%	18.2%	18.4%
<b>MOTHERBOARD</b>			
Model	Asus PRO Q570M	MSI MAG B650M	Asus PRIME Z790-V
Chipset	Q570 (Intel)	B650 (AMD)	Z790 (Intel)
Memory support	DDR4	DDR5	DDR5
Price (\$)	154.00	187.17	239.99
Budget share	25.1%	17.9%	7.8%
<b>RAM</b>			
Volume (GB)	16-24	32	48
Type	DDR4-2400	DDR5-5200	DDR5-6400
Price (\$)	37.00	119.99	239.99
<b>STORAGE DRIVE</b>			
Interface	SATA III	NVMe PCIe 4.0	NVMe PCIe 5.0
Read speed (MB/s)	500	7000	12000
Volume (GB)	240	500	2000
<b>VIDEO CARD</b>			
Availability	Integrated	Integrated	NVIDIA GeForce RTX 4070 (12GB)
<b>SUITABILITY</b>			
Electronic document management	✓ Excellent	✓ Excellent	✓ Excellent
Medical information system	✓ Acceptable	✓ Excellent	✓ Excellent
X-ray image processing	✗ Limited	✓ Acceptable	✓ Excellent
3D MRI/CT reconstruction	✗ Not applicable	✗ Limited	✓ Excellent
Duration of operation (years)	3-5	5-7	7-10
<b>CONCLUSION</b>			
	Basic office tasks	Universal solution	Diagnostic centers

*Identified limitations:*

- Outdated components: The extreme price optimization scenario selected a 2008 processor. Filtering by relevance is required (excluding models older than 5–7 years).
- Outdated platforms: Scenarios 1–3 selected platforms from 2008–2016. An additional criterion for platform relevance is required.
- Lack of forecasting: The system does not take into account long-term maintenance costs and the likelihood of failure.
- Static prices: Data in the Excel file may be out of date. Integration with online aggregators is necessary.

## Conclusions

The study confirmed the effectiveness of the adapted Saaty hierarchy process for multi-criteria selection of computer components in medical institutions.

The developed dynamic parameter balancing system with support for locking individual criteria significantly simplifies the configuration process compared to the classic method. Experimental validation on four scenarios demonstrated the algorithm's high accuracy in tracking user-set priorities. The difference in cost between the "Economy" (USD 612), "Balanced" (USD 1.045), and "Performance" (USD 3.084) configurations reflects adequate configuration scaling.

For medical institutions, this method allows for IT costs to be optimized by up to 38% over three years of operation while maintaining the required performance level. An economic analysis using the example of the Drabivsky Center for PMD Research and Production (Drabivsky Center for PMD) showed savings of USD 5.052 per eight workstations over three years.

A comparative analysis with existing approaches (Hotline.ua, BRAIN.com.ua, PCPartPicker, Telemart.ua) showed that the developed system is unified, combining mathematically sound multi-criteria analysis, comprehensive compatibility testing, dynamic parameter balancing, and cryptographic configuration protection. At the same time, the need for additional mechanisms was identified: filtering by component relevance, setting minimum performance thresholds, integration with online price aggregators, and a long-term cost forecasting module.

Further research areas include expanding the database through automated web scraping, adding a machine learning module to predict the likelihood of component failure, developing a mobile app for quickly assessing configurations, and scaling the system for corporate clients with centralized IT fleet management.

REFERENCES

1. Saaty T.L. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York, 1980, 287 p. <https://doi.org/10.21236/ADA214804>
2. Fainzilberh L.S., Zhukovska O.A., Yakymchuk V.S. *Decision theory*. Osvita Ukrainy, Kyiv, 2018, 246 p. [In Ukrainian: Файнзільберг Л.С., Жуковська О.А., Якимчук В.С. *Теорія прийняття рішень*]
3. Sytnyk M.V. System for selecting computer components to optimize the work of medical institutions. *122 Computer Sciences*, Kyiv, 2024, 94 p. [in Ukrainian: Ситник М.В. Система підбору комп'ютерних комплектуючих для оптимізації роботи медичних закладів] URL: <https://ela.kpi.ua/items/930710b5-0b92-463a-8504-fd84a11aa2d0> [Accessed 20 Oct. 2025]
4. Huang L. *Normalization Techniques in Deep Learning*. Synthesis Lectures on Computer Vision, Springer International Publishing, 2022, 110 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-14595-7>
5. Popova I.V. Justification of the choice of a potential supplier as a factor in increasing the stability of the enterprise. *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika»*, 2010, Issue 690, 421–426. [in Ukrainian: Попова І.В. Обґрунтування вибору потенційного постачальника як фактора підвищення стійкості підприємства] URL: <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/11454>
6. Synenko M.A. Saaty method in making managerial decisions on the example of a small business enterprise]. *Intelekt XXI*, 2018, Issue 1, 235–238. [In Ukrainian: Синенко М.А. Метод Сааті при прийнятті управлінських рішень на прикладі підприємства малого бізнесу] URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/int\\_XXI\\_2018\\_1\\_53](http://nbuv.gov.ua/UJRN/int_XXI_2018_1_53) [Accessed 20 Oct. 2025]

Received 26.10.2025

М.В. СИТНИК, студент магістратури,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,  
Берестейський просп., 37, м. Київ, 03056, Україна  
<https://orcid.org/0009-0003-3931-7312>  
[makspro1139@gmail.com](mailto:makspro1139@gmail.com)

Г.А. ПІДНЕБЕСНА, канд. техн. наук, старш. викладач,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
Берестейський просп., 37, м. Київ, 03056, Україна  
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,  
просп. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-5735-9861>  
[pidnebesna@ukr.net](mailto:pidnebesna@ukr.net)

ОПТИМІЗАЦІЯ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО  
ВИБОРУ КОМП'ЮТЕРНИХ КОМПЛЕКТУЮЧИХ  
НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ІЄРАРХІЙ

**Вступ.** У статті розглядається проблема оптимального вибору компонентів для персональних комп'ютерів у закладах охорони здоров'я в умовах обмеженого бюджету та множинних критеріїв оцінювання. Визначено, що традиційні методи вибору компонентів, засновані на емпіричному досвіді або простому порівнянні характеристик, є недостатньо ефективними для прийняття оптимальних рішень у ситуаціях багатокритеріального вибору. Обґрунтовано застосування адаптованого аналітичного ієрархічного процесу Томаса Сааті як ефективного інструменту для математично обґрунтованого багатокритеріального вибору компонентів з урахуванням технічної сумісності, енергетичного балансу та пріоритетів користувачів.

**Метою статті** є висвітлення особливостей адаптації методу аналізу ієрархій Сааті як проблеми багатокритеріального вибору компонентів комп'ютера та демонстрація його практичного застосування в контексті оптимізації ІТ-витрат медичних закладів з урахуванням технічної сумісності, енергетичного балансу та динамічного балансування пріоритетів користувачів.

**Методи.** Адаптований метод ієрархічного аналізу Томаса Сааті застосовано для багатокритеріального вибору компонентів з урахуванням технічної сумісності, енергетичного балансу та пріоритетів користувачів.

**Результати.** Подано систему динамічного балансування вагових коефіцієнтів з підтримкою блокування окремих параметрів, що забезпечує постійну суму ваг, що дорівнює 100%, зберігаючи при цьому пропорційність розблокованих параметрів. Розроблено багаторівневу систему фільтрації компонентів з урахуванням технічної сумісності (сокетів, форм-факторів, типів пам'яті тощо), енергетичного балансу системи, фізичних обмежень та трьох режимів оптимізації. Проведено детальний порівняльний аналіз наявних підходів до вибору компонентів на українському та світовому ринках, який виявив їхні обмеження та переваги.

**Висновок.** Наведено конкретні приклади застосування методу при виборі процесора для закладу охорони здоров'я, що демонструють чотири сценарії з різними пріоритетами параметрів та трьома режимами оптимізації. Експериментальна валідація підтвердила високу точність алгоритму у відстеженні визначених користувачем пріоритетів. Проведено аналіз економічної ефективності розробленого системного застосування, який продемонстрував потенційну економію до 25% ІТ-бюджету для закладів охорони здоров'я при збереженні необхідного рівня продуктивності.

**Ключові слова:** *метод аналізу ієрархій Сааті, багатокритеріальний вибір, вибір компонентів, заклади охорони здоров'я, динамічне балансування параметрів, оптимізація рішень, ІТ-інфраструктура.*

---

# DIGITAL MEDICINE

## ЦИФРОВА МЕДИЦИНА

<https://doi.org/10.15407/intechsys.2025.05.051>  
UDC 004.8 + 004.032.26

**С.І. КІФОРЕНКО**, д-р. біол. наук, старш. наук. співроб., провід. наук. співроб.,  
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,  
просп. Акад. Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-5575-9079>  
skifor@ukr.net

**В.М. БЕЛОВ**, д-р. мед. наук, професор, зав. відд.  
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,  
просп. Акад. Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна  
<https://orcid.org/0000-0001-8012-9717>  
motj@ukr.net

**М.В. ЛАВРЕНЮК**, канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри,  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,  
вул. Володимирська, 64/13, м. Київ, 01601, Україна  
<https://orcid.org/00000003-2476-6193>  
mykolalav@ukr.net

**Т.М. ГОНТАР**, канд. біол. наук, старш. наук. співроб., пров. наук. співроб.  
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,  
просп. Акад. Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-9239-0709>  
gtm\_kiev@ukr.net

**В.О. КОЗЛОВСЬКА**, наук. співроб.  
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,  
просп. Акад. Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна  
<https://orcid.org/0000-0001-5898-1639>  
vittoria13apr@gmail.com

## МЕТОДОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ІНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТІ В ПРИКЛАДНИХ ЗАДАЧАХ ОЦІНЮВАННЯ ТА ПІДТРИМКИ ЗДОРОВ'Я

---

*В статті обговорюється проблема використання методології інтерооперабельності при розробленні інформаційних систем біологічної та медичної спрямованості, в яких використовується системно-ієрархічний підхід. Сформульовано основні положення*

---

Цитування: Кіфоренко С.І., Белов В.М., Лавренюк М.В., Гонтар Т.М., Козловська В.О. (2025) Методологічні аспекти інтерооперабельності в прикладних задачах оцінювання та підтримки здоров'я. *Information Technologies and Systems*, Київ, 2025, Том 5 (5), 51–65. <https://doi.org/10.15407/intechsys.2025.05.051>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2025. Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

забезпечення інтеперабельності в складній структурно-ієрархічній системі кількісного оцінювання здоров'я з урахуванням наявних модельних уявлень щодо структурних особливостей інтеперабельності.

Розроблено комп'ютерну систему кількісного оцінювання здоров'я та його складників, а також систему підтримки реабілітаційних рішень з урахуванням персональних характерологічних властивостей за використання принципу інтеперабельності.

Використання принципу інтеперабельності при розв'язанні прикладних задач цифрової медицини дає можливість забезпечення взаємодії як окремих модулів в конкретних програмах, інформація в яких різноякісна, містить різні типи даних, так і взаємодії програмного забезпечення, створеного за різних мов програмування, і потребує узгодження при реалізації інформаційного обміну між цими програмами.

**Ключові слова:** інтеперабельність, категорія здоров'я людини, інформаційно-структурне моделювання здоров'я, принцип ієрархічності характер особистості, реабілітаційні заходи, комп'ютерна реалізація, цифрова медицина.

## Вступ

Розвиток комп'ютерних технологій, програмного забезпечення, форм і способів зберігання, оброблення та розповсюдження інформації визначив широке впровадження великої кількості різноманітних інформаційних систем як великомасштабних — в економіці, фінансовій сфері, в промисловості, так і локальних, безпосередньо пов'язаних зі специфікою розв'язання конкретних прикладних задач. В тому числі набули актуальності прикладні комп'ютерні розробки в медичній сфері, в валеології, цифровій медицині, яка безпосередньо пов'язана зі здоров'ям людини, його підтримкою та збереженням. Це відкрило нові можливості у розв'язанні реальних задач підтримки прийняття рішень і, в той же час, призвело до ускладнення як під час їх розроблення, так і під час використання. Складності пов'язані з проблемами забезпечення взаємодії як окремих модулів в конкретних програмах, інформація в яких різноякісна, містить різні типи даних, так і взаємодії програмних систем, створених за різних мов програмування, що теж потребує під час реалізації інформаційного обміну між цими системами.

В сучасному інформаційному просторі широко використовується термін *Інтеперабельність* — це ключовий термін, який означає здатність до взаємодії різних систем, реалізовану на базі стандартних правил та уніфікованих інтерфейсів, що надає можливість обмінюватися інформацією та осмислено її використовувати. Цій проблематиці присвячено велику кількість публікацій, наприклад [1–7], в яких проведено огляд і аналіз досягнень в цій сфері діяльності з урахуванням специфіки використання, запропоновано інформаційно-структурну модель інтеперабельності, детально описано її принципівий базис і можливості використання.

Зазначимо, що інформаційні системи, які створюються в медичних та біологічних дослідженнях, мають відтворювати принципіві властивості реальних систем, для яких вони призначені. Оскільки здоров'я людини забезпечується завдяки збалансованій, злагодженій

взаємодії функціонування складових компонент та процесів в організмі — ці особливості повинні враховуватися і під час розроблення відповідних комп'ютерних систем підтримки прийняття рішень у діагностиці стану здоров'я і у його підтримці. Комп'ютерні системи, які розробляються для підтримки прийняття рішень за діяльності, що пов'язана зі здоров'ям людини, мають складну структуру і складаються з великої кількості взаємодійних підсистем, що об'єднані для досягнення мети певною сукупністю зв'язків і правил функціонування. Ефективність таких комп'ютерних програмних систем залежить від того, наскільки якісно в них реалізовані процеси взаємодії та обміну даними. Для забезпечення збалансованої взаємодії модульної структури інформаційно-комп'ютерних систем, які створюються за розв'язання задач в прикладних розробках цифрової медицини, пов'язаних з оцінюванням та підтримкою здоров'я, доцільним є використання технології інтегрованості. Завдання нашого дослідження — обґрунтувати доцільність та необхідність використання методології інтегрованості при розробці складних інформаційних систем біологічної та медичної спрямованості; сформулювати основні положення забезпечення інтегрованості в структурно-ієрархічній системі кількісного оцінювання здоров'я з урахуванням наявних модельних уявлень щодо структурних особливостей інтегрованості; виявити методологічні принципи інтегрованості в розробленій комп'ютерній системі кількісного оцінювання здоров'я та його складників в комп'ютерній системі підтримки реабілітаційних рішень.

**Поняття інтегрованості** з'явилося у зв'язку з необхідністю практичного об'єднання модулів, компонентів і програм [1–3]. Інтегрованість, — це можливість взаємодії двох або більше компонентів, програм і систем для обміну інформацією і використання її для раціональної організації обчислень. Основу інтегрованості складають набори стандартів інформаційно-комунікаційних технологій.

Відповідно до загальноприйнятого визначення, даного організаціями зі стандартизації «...інтегрованість — це здатність двох або більше інформаційних систем або компонентів до обміну інформацією та використання інформації, отриманої в результаті обміну» [4]. При цьому забезпечення інтегрованості складних систем реалізується завдяки розробленню стандартів інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ-стандартів/профілів), відповідних протоколів, тощо. Ці розробки наразі дуже актуальні, широко представлені в монографіях, конкретних публікаціях, дисертаційних роботах, наукових звітах. Загострення проблеми технічної сумісності різних засобів передачі і обробки інформації, інтерфейсів засобів зв'язку свідчить взагалі про глобальну проблему розробки принципів, підходів, методів інтегрованості.

Проблема взаємодії окремих компонентів існує в більш широкому аспекті і на різних рівнях дослідження складних систем в разі

забезпечення взаємоузгодженості, взаєморозуміння та охоплює не тільки технічні аспекти взаємозв'язків між різноякісними інформаційними складниками. Під час розроблення складних систем необхідно збалансовано враховувати *принцип інтегрованості* – цілісності, системності і *принцип інтероперабельності* – функційної взаємодії між усіма складовими цілісної структури системи, яку розробляють.

В багатьох дослідженнях і науково-технічних розробках використовують такі поняття як інтероперабельність і сумісність, але чіткої різниці між ними не проводять. Що стосується цього, то інтероперабельність є більш широким поняттям ніж сумісність і враховує не тільки саму можливість взаємодії різних систем і їх компонентів, але й технологічні параметри, які забезпечують цей багатофункційний зв'язок.

В оглядах Європейської комісії зазначається, що поняття інтероперабельності в багатьох країнах розглядається як невід'ємний елемент цифрової трансформації життєдіяльності суспільства в різних аспектах [6, 7]. Особливої актуальності набуло використання цього терміну в зв'язку з появою і розвитком мережі інтернет, яка є великим гетерогенним інформаційним середовищем, існування якого без реалізації взаємозв'язків неможливе взагалі.

Необхідність забезпечення інтероперабельності і трактування різноманітних взаємозв'язків в складних системах, що розробляються, спонукало дослідників провести їх класифікацію та запропонувати можливі типи і рівні реалізації. [5–7, 8].

**Інформаційна (описова) модель інтероперабельності.** Проблема забезпечення інтероперабельності є досить багатогранною, охоплює безліч різних аспектів, які можна розглядати на таких рівнях: організаційному, синтаксичному, семантичному і технічному [5, 9–11].

На *організаційному* рівні інтероперабельність забезпечується регламентацією виконання загальних вимог: мета, задачі, стратегія, плани; встановлюється порядок взаємодії між підпорядкованими загальній меті інформаційно-концептуальними структурами, вимогами, тощо [8].

На *синтаксичному* рівні – інтероперабельність реалізується завдяки розробці стандартів, формальних правил, відповідності форматів і протоколів передачі / отримання даних, задіяних в розроблюваних системах для успішного обміну.

*Семантична* інтероперабельність – здатність компонентів, модулів, об'єктів, що взаємодіють і утворюють цілісну структуру адекватно інтерпретувати зміст інформації, якою вони обмінюються, забезпечувати «взаєморозуміння» з певною точністю, уникати неоднозначності тлумачень.

На *технічному* рівні формалізуються процеси інформаційної взаємодії між технічними системами, технічними засобами, апаратними та програмними комплексами з урахуванням особливостей реалізації їх інтерфейсів, форм та форматів надання інформації. Підкресли-

мо, що технічна інтегрованість — здатність до обміну інформацією між системами, з використанням програмно-технічних засобів.

Цей принцип структурування ми використовуємо для розв'язання задач біологічної та медичної спрямованості, що підвищує ефективність підтримки прийняття відповідних діагностичних та керувальних рішень для оцінювання та підтримки здоров'я людини в цілому та його складових.

## **Задачі кількісного оцінювання здоров'я в контексті інтегрованості**

Погляд на здоров'я крізь призму ієрархічності можна подати як структуру реальної досліджуваної предметної області (здоров'я), основу якої складають три найважливіших складники: фізичний, психічний та соціальний, кожен з яких зі свого боку базується на сукупності підсистем зі складною, дуже розгалуженою мережею зв'язків. Кожен складник має певну інформаційну цінність і як самостійний елемент, і як такий, що пов'язаний з усіма іншими у цілісному нероздільному комплексі. Окремі модулі цієї системи розглядаються в комплексі з усією складною архітектурою взаємозв'язків щодо здоров'я людини в цілому, де може надаватись пріоритет на певному етапі досліджень.

Розвиток комп'ютерних технологій, програмного забезпечення, форм і способів зберігання, оброблення та розповсюдження інформації в цифровій медицині відзначено широким впровадженням великої кількості різноманітних інформаційних систем, безпосередньо пов'язаних зі специфікою розв'язання конкретних прикладних задач. В тому числі набули актуальності прикладні комп'ютерні розробки в діагностичній медичній діяльності і в валеології — сфері, яка безпосередньо пов'язана зі здоров'ям людини, його підтримкою та збереженням. Це відкрило нові можливості у розв'язанні реальних задач підтримки прийняття рішень і, в той же час, призвело до їх ускладнення під час розроблення та використання. Це ускладнення пов'язане з проблемами забезпечення інтегрованості, тобто взаємодії і сумісності як окремих модулів в конкретних програмах, інформація в яких різноякісна, містить різні типи даних, так і взаємодії програмного забезпечення, створеного за різних мов програмування, що теж потребує узгодження в разі реалізації інформаційного обміну між цими програмами.

Комп'ютерні системи, які розробляються для підтримки прийняття рішень за діяльності, пов'язаної зі здоров'ям людини, мають складну структуру і складаються з великої кількості взаємодійних підсистем, що об'єднані для досягнення мети певною сукупністю зв'язків і правил функціонування. Ефективність таких комп'ютерних і програмних систем залежить від того, наскільки якісно в них реалізовані процеси взаємодії та обміну даними, інакше — як виконується принцип інтегрованості. Зазначимо, що таку методологію,

на якій ґрунтується принципово-загальна описова модель інтероперабельності, про яку йшлося вище, можна спроектувати на системі локального рівня реалізації спеціального призначення. У нашому випадку це – система кількісного оцінювання здоров'я людини, якій ми приділили значну увагу.

Здоров'я людини як система має складну ієрархічну структуру, розгалуження якої ґрунтується на трьох основних складових (статусах): фізичній, психічній і соціальній, кожна з яких зі свого боку має безліч підсистем, модулів, показників. Водночас, організаційний рівень інтероперабельності для системи кількісного оцінювання здоров'я полягає в розробленні самої концепції оцінювання – тобто в ієрархічній структурі організації дослідження. Розроблення інформаційної моделі оцінювання здоров'я людини з урахуванням особливостей його фізичного та психосоціального статусу з використанням технології інфотомування, яка є віртуальною ієрархією структури статусу здоров'я, що охоплює сам статус, його компоненти, складові компоненти статусу, показники функціонування компонентів [12]. Загальну структуру організації досліджень подано на рис. 1.

*Синтаксичний рівень* інтероперабельності, у нашому випадку, забезпечується завдяки спеціально розробленому синтаксису – методу *нормування* різноякісних показників МНУРІ, який задає метричну визначеність показників, стосовних здоров'я людини [13, 14]. Отже, завдяки процедурі нормування, різні шкали вимірювань трансформуються в єдину нормовану шкалу, роздільні позиції якої змінюються в діапазоні [0–1].

*Семантичний рівень* – на основі розробленого синтаксису, (нормування) який є базою для «взаєморозуміння», розглядаються дані, що вимірюються в різних одиницях в єдиному смисловому полі. Це дає змогу порівнювати інтенсивність дії фізіологічних показників, які вимірюються в різних одиницях, заздалегідь оцінити в комплексі силу прояву взаємодії різних за призначенням фізіологічних підсистем різного рівня ієрархії. Це забезпечує можливість зрозумілої користувачеві інтерпретації щодо взаємоузгодженої інтенсивності взаємодії між конкретними підсистемами та їхніми складовими.

Такий принцип забезпечення взаємодії, з урахуванням рівнів інтероперабельності, зазначених вище: організаційному, синтаксичному, семантичному і програмно-технічному за кількісного оцінювання здоров'я і його складників, раніше програмно реалізовано у комп'ютерній програмі «Експрес діагностика» системи експрес діагностики стану здоров'я (СЕДСЗ) [15].

*Організаційний рівень* СЕДСЗ забезпечується завдяки розробці структурно-алгоритмічної схеми системи, яка ґрунтується на реляційній базі даних, компоненти якої можна умовно розділити на діагностичної та користувальницьку категорії. Під категорію діагностичної компоненти укладається необхідний базис, який забезпечує процес діагностики та поданий як набір таблиць, що містять напрями дос-

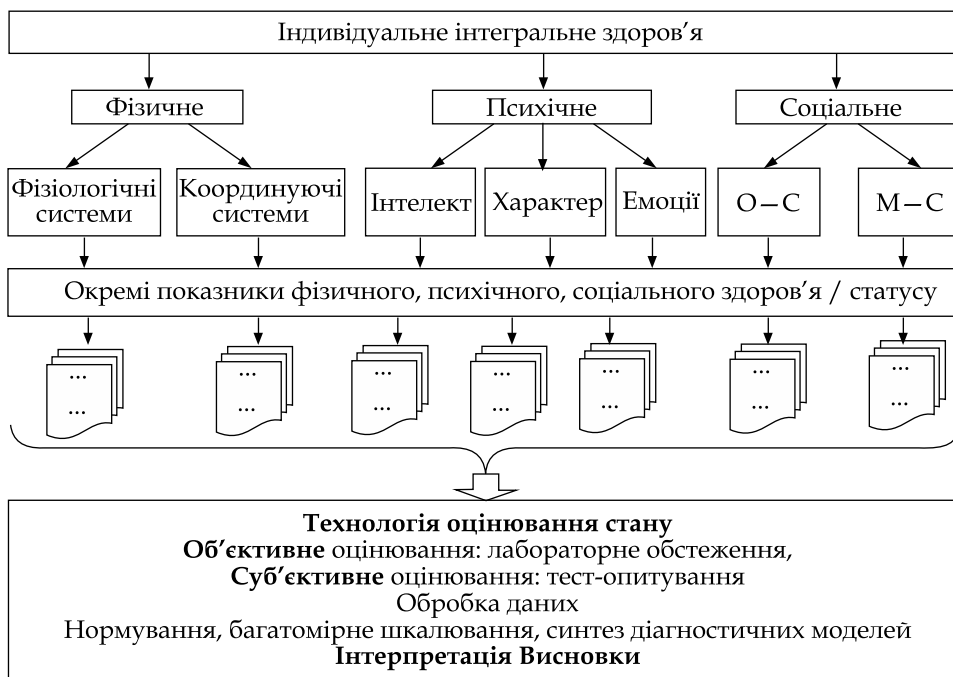


Рис. 1. Загальна концептуальна структура організації дослідження

ліджень, тести-запитання, питання та варіанти відповідей. Користувальницька категорія бази здійснює можливість фіксувати дані кожного користувача, включно з отриманими результатами з компонентами діагностики.

Синтаксичний рівень системи СЕДСЗ це – мови програмування, необхідні для раціональної організації складної архітектури зв'язків розробленого комплексу. (Мови програмування та зв'язки між ними). Систему реалізовано на об'єктно-орієнтованих мовах PHP, JavaScript, на базі технології AJAX та MySQL.

На семантичному рівні комп'ютерна програма СЕДСЗ пропонує користувачу набір спеціально розроблених анкет, відомих тестів та методик діагностики та оцінювання компонентів, складових та показників психічного, фізичного та соціального статусів. Система експрес-діагностики дає змогу на підставі понад 70 показників самооцінки користувачем свого поточного стану в реальному часі «тут і зараз» вивести кількісний індекс здоров'я з урахуванням особливостей фізичного, психічного та соціального статусів здоров'я організму та особистості. Після проходження методик тестування програма реалізує на базі зазначених мов програмування наочну візуалізацію звіту з наданням певних вербальних висновків інтерпретувати кількісну міру оцінювання здоров'я та його складових завдяки розробленій процедурі нормування.

Технічний рівень інтероперабельності – рівень, на якому виконується алгоритмічно-програмна реалізація правил і процедур для за-

безпечення взаємодії та передачі даних, розроблених на трьох попередніх рівнях, — організаційному, синтаксичному і семантичному.

Програмне забезпечення СЕДСЗ спочатку було спроектовано так, щоб відокремити процес кількісних розрахунків відповідних індексів за первинними даними від процесу збору даних [16]. У такій архітектурі обчислювальною компонентою створеного програмного забезпечення є ядро (*engine*), яке може бути використане і в комплексі з діалоговою компонентою — для інтерактивного тестування, і без неї — для пакетної обробки експериментального масиву.

Для локального використання створено додатковий інсталяційний пакет, який встановлює віртуальний сервер WAMP (за умови ліцензії GNU), переписує файли СЕДСЗ та встановлює набір невеликих компільованих програм. Програми підтримки запуску СЕДСЗ реалізовані на C#. Їхнє коректне виконання вимагає наявності *Framework 2.0*, у зв'язку з постійним зверненням до нього. Тому під час запуску СЕДСЗ програми підтримки перевіряють наявність і роботу необхідних запущених служб *httpd* і *sql*, і на платформі *wampmanager* запускають створений спеціально під СЕДСЗ локальний браузер, що використовує ядро *Internet Explorer*'а.

Модель СЕДСЗ побудована згідно з гібридним підходом, який дає змогу проходити експрес-діагностику в режимі *on-line* у глобальних та локальних мережах та на персональному комп'ютері, при цьому використовується єдиний програмний комплекс. Реалізація розроблених алгоритмів у комп'ютерних та мобільних додатках дає можливість проводити обстеження на персональному комп'ютері, смартфоні та в режимі *on-line* у мережах, що підвищує ефективність підтримки самостійного прийняття рішень за контролю та корекції здоров'я людини.

## **Комп'ютерна система реабілітаційної підтримки з урахуванням особливостей характеру людини в контексті інтерооперабельності**

Алгоритмічно-програмні розробки експрес-діагностики трьох статусів здоров'я адаптовано для розв'язання актуальних прикладних завдань створення системи вибору реабілітаційних заходів з урахуванням сили прояву властивостей *характеру* людини. Проблема розроблення і використання інформаційних систем, пов'язаних зі здоров'ям українців, які перенесли надмірне психологічне перенапруження і потребують удосконаленого доступу до психологічної підтримки — в центрі уваги багатьох науковців [17, 18].

Вважаємо, що рішення, які треба приймати людині, що перебувала в складних психогенних ситуаціях, набула при цьому тяжких психологічних проблем, яка мріє повернутися до нормального психологічного стану — базуються переважно на особистісних властивостях характеру людини. Саме характер є тим визначальним ключем

човим фактором, що формує поведінку особистості в складних ситуаціях і визначає напрямок його подальшої життєдіяльності [19, 20].

Розглядаючи характер у контексті інтегрованості, зазначимо, що саме характер, як найважливіший компонент психічної складової здоров'я, є пусковим механізмом, який забезпечує взаємодію систем організму при формуванні реабілітаційних рішень з урахуванням змінних обставин у зовнішньому середовищі і функційними можливостями свого внутрішнього стану. Зазначимо, що у цьому разі забезпечується *семантична складова* інтегрованості, що полягає у психологічному прояві мотивації, волі прийняття адекватних рішень щодо подолання зовнішніх збурень. Відбувається взаємоузгодження між характером людини та вибором оздоровчих реабілітаційних дій з необхідними можливостями активності людини для досягнення мети одужання.

У подальшому, розроблення системи прийняття реабілітаційних рішень з урахуванням характерологічних особливостей, що базується на кількісному оцінюванні їхніх складових, є вкрай важливим, бо дає змогу підвищити роздільну здатність вибору реабілітаційних заходів для осіб з психогенними проблемами. Передумовою кількісного оцінювання складових характеру є розроблення класифікації інформаційного простору щодо типів і властивостей характерологічної компоненти психічного статусу [21].

Для ідентифікації складників характерологічного компонента психічного здоров'я розроблено спеціальну анкету-опитувальник, за якою виконується кількісне оцінювання якостей характеру. Алгоритм анкетного тестування та кількісного оцінювання є програмно реалізованим, пройшов пілотну апробацію та довів свою діагностичну ефективність [22]. Результати цього оцінювання передаються для подальшої обробки на вхід керувальної системи, в якій пропонуються реабілітаційні заходи на основі розробленої класифікації та результатів кількісної ідентифікації основних властивостей характеру.

*Технічний рівень інтегрованості в задачі вибору реабілітаційних заходів з урахуванням характеру особистості.* На етапі подальшого розроблення комплексу оцінювання характеру і надання реабілітаційних послуг з урахуванням його кількісного оцінювання виникає проблема інтегрованості на технічному рівні. Реалізація пов'язана з необхідністю взаємодії програмного забезпечення, створеного за різними мовами програмування. Програма «ТОХО-20» реалізована на мові програмування C#, програма «ХАРАКТЕР+РЕАБІЛІТАЦІЯ» розробляється на мові програмування *Delphi* з використанням середовища розробки *Embarcadero RAD Studio*.

Реалізація інтегрованості між цими програмами виконується так: програма «ХАРАКТЕР+РЕАБІЛІТАЦІЯ» одержує результати роботи програми «ТОХО-20» який зберігається як файл даних у форматі *csv*. Вихідні дані програми «ТОХО-20» — це п'ятикомпо-

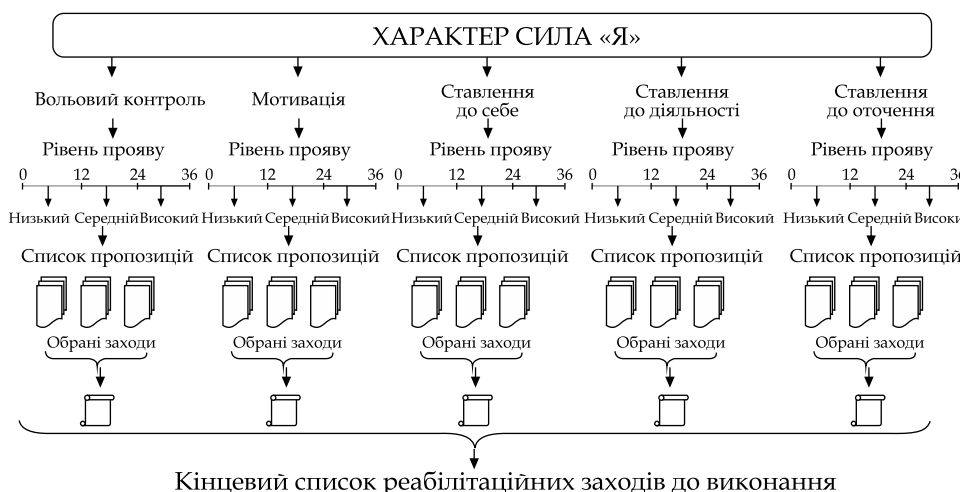


Рис. 2. Інформаційна структура послідовності вибору реабілітаційних заходів залежно від інтенсивності прояву властивостей характеру

нентний вектор, кожний компонент якого є кількісною оцінкою в балах п'яти опорних властивостей характеру відповідно до розробленої класифікації. Далі на основі цього файлу будується реляційна база даних, з якої планується розроблення модульної структури програми вибору реабілітаційних дій з урахуванням характерологічних властивостей особистості. Інформаційно-логічна послідовність вибору реабілітаційних пропозицій залежно від сили прояву складових характеру за результатами оцінювання на відповідних шкалах ілюструє рис. 2.

Блок-схему основного алгоритму роботи програми вибору реабілітаційних заходів, побудованого на основі розробленої класифікації робочого інформаційного простору, наведено на рис. 3.

Архітектура та функційне наповнення Програми має модульну структуру, у складі якої містяться модулі інформаційні, формально-логічні (що реалізують та синхронізують зв'язки та відносини) та модулі, що реалізують користувацький інтерфейс.

Інформаційний ресурс подано спеціалізованими базами даних, розкласифікованими за описаними раніше критеріями. При цьому використано технологію реляційного моделювання, згідно з якою інформаційними модулями є ієрархічно організовані електронні таблиці, узгоджена взаємодія між якими підтримується спеціальними програмними процедурами та реалізується з допомогою системи управління базами даних. Зберігання інформації та обмін даними між модулями здійснюється на основі файлової системи та динамічно-завантажуваних бібліотек (DLL). Робота програми полягає у конструюванні послідовності запитів до реляційної бази даних із подальшим наданням звіту у таблично-графічній формі.

Узагальнена оцінювально-керувальна структура реабілітаційного комплексу підтримки прийняття рішень особами, що перебува-



Рис. 3. Принципова блок-схема основного алгоритму роботи програми

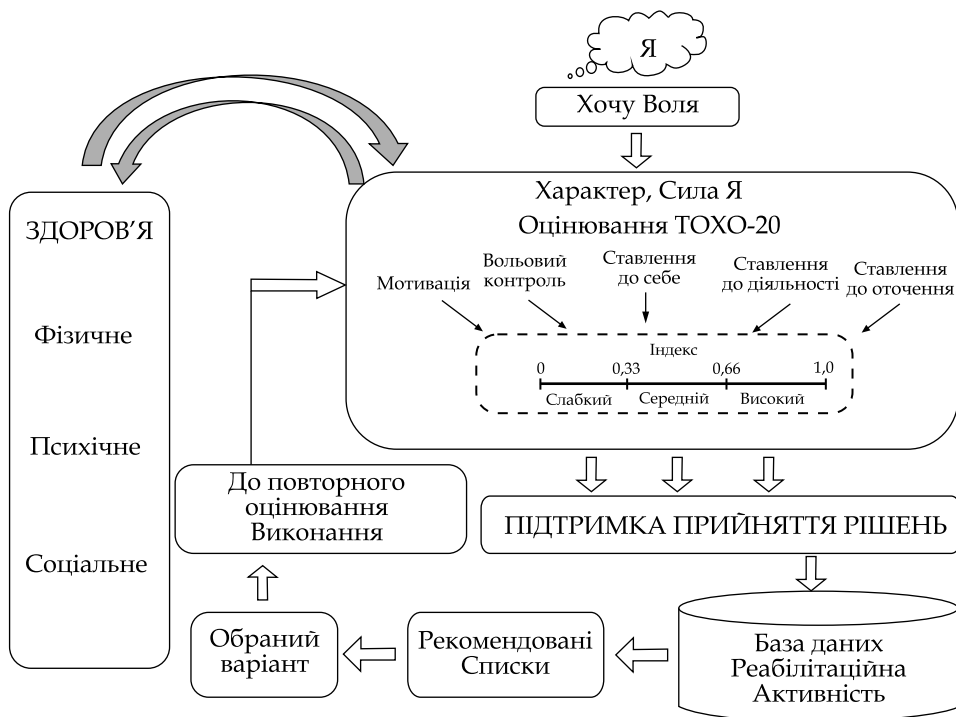


Рис. 4. Інформаційно-алгоритмічна структура системи вибору реабілітаційних заходів з урахуванням стану здоров'я в цілому та сили прояву властивостей характеру

ють в умовах глобальних психогенних факторів, з урахуванням стану їх здоров'я та характерологічних властивостей наведена на рис. 4.

Розроблена інформаційна технологія, реалізована в комп'ютерній системі підтримки прийняття рішень, є технологічним інструментом підвищення оперативності надання необхідної специфічної інформації користувачу під час вибору реабілітаційних заходів з урахуванням сили властивостей його характеру.

## Висновки

Використання принципу інтероперабельності у розв'язанні прикладних задач цифрової медицини створює можливість забезпечення взаємодії як окремих модулів в конкретних програмах, інформація в яких різноякісна, містить різні типи даних, так і взаємодії програмного забезпечення, створеного за різних мов програмування, що потребує узгодження реалізації інформаційного обміну між цими програмами.

Реалізація інтероперабельності в задачах оцінювання та підтримки здоров'я виконується завдяки розробці комплексного програмного забезпечення, в якому об'єднані програмні модулі: експрес-діагностики стану трьох статусів здоров'я, модуль оцінювання характерологічних особливостей людини і керувальний модуль вибору реабілітаційних заходів. Саме функціонування в комплексі трьох модулів оптимізує реабілітаційний процес і забезпечує ефективну взаємодію розробленої системи підтримки прийняття рішень, а урахування стану характерологічної компоненти при синтезі програм самокерування здоров'ям дає змогу індивідуалізувати підбір керуючих впливів і досягти їх більшої ефективності.

## ЛИТЕРАТУРА / REFERECES

1. Lavrishcheva E.M. Formal bases of interoperability of components in programming. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2010, Vol. 46 (4), 134-150. [In russian]
2. Proydakov E.M., Teplitsky E.A. *English-Ukrainian Explanatory Dictionary of Computer Science, Internet and Programming*. Publishing House «SoftPress», Kyiv, 2005, 552 p. [In Ukrainian: Проїдаков Е.М., Теплицький Е.А. *Англо-український тлумачний словник з обчислювальної техніки, Інтернету і програмування*]
3. Lavrisheva K.M. General programming of software systems and their families. *Problems of programming*, 2009, Issue 1, 3-16. [In Ukrainian: Лавріщева К.М. Генерувальне програмування програмних систем і сімейств]
4. DSTU ISO/IEC/IEEE 24765:2018 International Standard. Systems and Software Engineering. Vocabulary (ISO/IEC/IEEE 24765:2017, IDT)
5. Berg C. Interoperability. *Internet Policy Review*, 2024, Vol. 13 (2). <https://doi.org/10.14763/2024.2.1749>
6. Palagin A.V. Problems of transdisciplinarity and the role of informatics. *Cybernetics and system analysis*, 2013, Vol. 49 (5), 3-13. [In russian]
7. Fernandes J., Ferreira F., Cordeiro F., Neto V.G., Santos R. How can interoperability approaches impact on systems-of-information systems characteristics? *The XVI Brazilian Symposium on Information Systems*, Nov. 2020, 1-8.

8. Kunev V. Extended RSA-M Algorithm as a Way of Increase Computational Complexity of Cryptosystems. *Journal of Engineering Science*, 2018, Vol. 25 (2), 45–56. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2564485>
9. Abduljabbar R., Jalil M.A. Network-Centric Approaches in Systems Development Life Cycle (SDLC): A Comprehensive Survey. *Babylonian Journal of Networking*, 2023, 77–81.
10. Nilsson J., Javed S., Albertsson K., Delsing J., Liwicki M., Sandin F. AI concepts for system of systems dynamic interoperability. *Sensors*, 2024, Vol. 24 (9), Article 2921.
11. Zaloha V.O. Bases of decision-making in managing the life cycle processes of complex products and military equipment. Science report, 2021. [In Ukrainian: Залога В. О. Основи прийняття рішень при управлінні процесами життєвого циклу складних виробів та об'єктів військової техніки] URL: [https://sumdu.edu.ua/images/content/science/research/2021\\_Zaloga-min.pdf](https://sumdu.edu.ua/images/content/science/research/2021_Zaloga-min.pdf)
12. Kiforenko S.I., Belov V.M., Hontar T.M. The Hierarchy Principle as the Basis of Biological Systems Research. *Cybernetics and Computer Engineering*, 2022, Vol. 207 (1), 74–84. [In Ukrainian: Кіфоренко С.І., Белов В.М., Гонтар Т.М. Принцип ієрархічності – основа дослідження біомедичних систем] <https://doi.org/10.15407/kvt207.01.074>
13. Kiforenko S.I., Belov V.M., Hontar T.M., Kozlovska V.O., Obelets T.A. Methodological Aspects of Using Normometrical Scaling for Multidimensional Assessment of Health Reserves. *Cybernetics and Computer Engineering*, 2022, Vol. 209 (3), 63–80. [In Ukrainian: Кіфоренко С.І., Белов В.М., Гонтар Т.М., Козловська В.А., Обелець Т. А. Методологічні аспекти використання нормометричного шкалювання для багатовимірного оцінювання резервів здоров'я] <https://doi.org/10.15407/kvt208.03.063>
14. Belov V.M., Kotova A.B., Pustovoit O.G. Method of normalized unification of information of different quality. Utility Model Patent No. 11235 [In Ukrainian: Белов В.М., Котова А.Б., Пустовойт О.Г. Спосіб нормованої уніфікації різноякісної інформації] URL: <https://sis.nipo.gov.ua/en/search/detail/293472/> [Accessed 20 Sep. 2025]
15. Belov V.M., Kotova A.B., Dubovenko M.M., Kiforenko S.I. Computer program “System of express-diagnostic of the health status”. Copyright of the work № 37242, published 04. Mar. 2011. [In Ukrainian: Белов В.М., Котова А.Б., Дубовенко М.М., Кіфоренко С.І. Комп'ютерна програма «Система експресдіагностики стану здоров'я»]
16. Belov V.M., Kotova A.B. *Human health: challenges, methods, approaches*. Monograph, Naukova dumka, Kyiv, 2017, 134 p. [In russian]
17. Korolchuk M.S., Korolchuk V.M., Kulazhenko A.I. et al. *Psychological features of long-term consequences of stress-induced influences*: monograph. KNUTE, Kyiv, 2014, 275 p. [In Ukrainian: Корольчук М.С., Корольчук В.М., Кулаженко А.І. та ін. Психологічні особливості віддалених наслідків стресогенних впливів]
18. Chaban O.S., Khaustova O.O., Omelyanovich V.Yu. Mental disorders of wartime: monograph, Medknyha, Kyiv, 2023, 231 p. [In Ukrainian: Чабан О.С., Хаустова О.О., Омелянович В.Ю. Психічні розлади воєнного часу]
19. Grinova O.M. The problem of character in Ukrainian and foreign psychology (theoretical aspect). *Collection of Research Papers «Problems of Modern Psychology»*, 2019, Vol. 12, 278–293. [In Ukrainian: Гріньова О. Проблема характеру в українській та зарубіжній психології (теоретичний аспект)] <https://doi.org/10.32626/2227-6246.2011-12.%25p>
20. Belov V.M., Kozlovska V.A., Kobzar T.A., Kovalev V.M. Information technology for assessing personality characteristics for selecting rehabilitation interventions for post-traumatic syndrome. *International scientific practical conference Information technologies: science, engineering, technology, education, health. MicroCAD*, Kharkiv, 2021, p 308. [In Ukrainian: Белов В.М., Козловська В.А., Кобзар Т.А., Ковальов

- В.М. Інформаційна технологія оцінювання характерологічних особливостей особистості для вибору реабілітаційних впливів при посттравматичному синдромі]
21. Belov V.M., Kiforenko S.I., Lavreniuk M.V., Hontar T.M., Kozlovska V.O. Information and Computer Technology for Supporting Human Mental Health Taking into Account its Characterological Properties. *Cybernetics and Computer Engineering*, 2024, Vol. 217 (3), 83–100. [In Ukrainian: Белов В.М., Кіфоренко С.І., Лавренюк М.В., Гонтар Т.М., Козловська В.О. Інформаційно-комп'ютерна технологія підтримки психічного здоров'я людини з урахуванням її характерологічних властивостей] <https://doi.org/10.15407/kvt217.03.083>
  22. Kozlovska V.O., Belov V.M., Dubovenko M.M. Computer program "Test "Personality Character Assessment" ("ТОКНО-20")". Copyright of the work № 103805, published 07 Apr. 2021. [In Ukrainian: Козловська В.О., Белов В.М., Дубовенко М.М. Комп'ютерна програма «Тест «Оцінювання характеру особистості» («ТОХО-20»)»]

Отримано / Received 24.09.2025

S.I. KIFORENKO, DSc (Biology), Senior Researcher, Leading Researcher, Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine, 40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-5575-9079>  
skifor@ukr.net

V.M. BELOV, DSc (Medicine), Professor, Head of Department, Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine, 40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0001-8012-9717>  
motj@ukr.net

M.V. LAVRENYUK, PhD (Phys.-Math.), Associate Professor, Taras Shevchenko National University of Kyiv, 64/13, Volodymyrska str., Kyiv, 01601, Ukraine  
<https://orcid.org/00000003-2476-6193>  
mykolalav@ukr.net

T.M. HONTAR, PhD (Biology), Senior Researcher, Leading Researcher Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine, 40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-9239-0709>  
gtm\_kiev@ukr.net

V.O. KOZLOVSKA, Researcher Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine, 40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0001-5898-1639>  
vittoria13apr@gmail.com

#### METHODOLOGICAL ASPECTS OF INTEROPERABILITY IN APPLIED TASKS OF HEALTH ASSESSMENT AND SUPPORT

**Introduction.** The focus of our research is the problem of using the interoperability methodology in the development of biological and medical information systems based on a system-hierarchical approach. Technological support for the interoperability of decision support systems in various areas of human activity improves the quality of their functionality, making them effective, understandable, and accessible for wide use.

**The purpose** of the development is to show the feasibility of using a methodological approach using interoperability technology to ensure balanced interaction of the modular structure of information and computer systems, which are created when

solving problems in applied developments of digital medicine related to health assessment and support.

**Research methods:** hierarchical synthesis of information components of three health statuses, structural-functional modeling, method of hierarchical convolution of different quality indicators, quantitative health assessment – method of calculating the personal health index, and technology of algorithmic and software modeling.

**Results.** The main provisions for ensuring interoperability in a complex structural-hierarchical system of quantitative health assessment are formulated, taking into account existing model ideas regarding the structural features of interoperability. Attention is focused on the principle of interoperability used in the developed computer system of quantitative health assessment and its components. This principle is also implemented in the rehabilitation decision support system, taking into account personal characterological properties. In the synthesized system, interoperability is achieved by developing a complex software that combines software modules: express diagnostics of the state of three health statuses, a module for assessing the characterological features of a person based on the developed classification, and a control module for selecting rehabilitation measures depending on the intensity of the manifestation of characterological components.

**Conclusion.** The use of the principle of interoperability in solving applied problems of digital medicine, including the problem of developing a rehabilitation decision support system, makes it possible to ensure the interaction of both individual modules in specific programs. The information in these programs is of different quality, contains different types of data, and involves the interaction of software created in different programming languages. It requires coordination when implementing information exchange between these programs. The functioning of these three software modules in a complex ensures effective interaction of the developed decision support system and optimizes the rehabilitation process.

**Keywords:** *human health category, hierarchical principle, information and structural modeling of health, interoperability, digital medicine.*

---

# DIGITAL TECHNOLOGIES IN LEARNING

## ЦИФРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ В НАВЧАННІ

<https://doi.org/10.15407/intechsys.2025.05.066>  
UDC 303.721; 004.03142

**S.P. KUDRIAVTSEVA**, PhD (Engineering), Senior Researcher, Leading Researcher,  
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,  
40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-0450-3388>  
svetaa@irtc.org.ua

**O.Ye. VOLKOV**, PhD (Engineering), Senior Researcher, Director,  
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,  
40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-5418-6723>  
alexvolk@ukr.net

**K.M. SYNYSYA**, PhD (Engineering), Senior Researcher, Leading Researcher,  
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,  
40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-7417-1748>  
ksynytsya@irtc.org.ua

**Ye.A. SAVCHENKO-SYNIKOVA**, PhD (Engineering),  
Senior Researcher, Leading Researcher,  
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,  
40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-4851-9664>  
savchenko\_e@meta.ua

---

## DIGITAL TRANSFORMATION MODEL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT EDUCATION

---

*A new model for digital transformation of education to achieve sustainable development goals is proposed. It takes into account the input of stakeholder communities and an assessment of the current state of transformation. This enables the parallel development of tasks assigned to different stages, takes into account changes in technology and the regulatory framework, and plans training for participants in transformation processes, particularly based on the examples and results of other models. The elements that distinguish education for sustainable development from other models are identified. The model is built taking into account the dynamics of the environment in which change occurs and the network connections between participants.*

---

Cite: Kudriavtseva S.P., Volkov O.Ye., Synytsya K.M., Savchenko-Syniakova Ye.A. Digital Transformation Model for Sustainable Development Education. *Information Technologies and Systems*, Kyiv, 2025, Vol. 5 (5), 66–82. <https://doi.org/10.15407/intechsys.2025.05.066>

© Publisher PH “Akademperiodyka” of the NAS of Ukraine, 2025. The article is published under an open access license CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

*Furthermore, the model demonstrates the principles of education for sustainable development in action – collaboration in the development of solutions and the implementation of technologies, a balance between local innovation implementation plans and centrally supported strategic directions.*

**Keywords:** *digital transformation, sustainable development goals, educational transformation model, agile approach.*

## **Introduction**

The Sustainable Development Goals (SDG) [1] were formulated as a response to the 21st-century challenges that humankind is facing in social, economic, ecological, and other spheres. Ecological disasters caused by climate change, the quick spread of disease due to the increased number of travelers, and the technological impact on ecosystems are just some examples of the global challenges that need to be addressed by coordinated efforts using multifaceted approaches. These problems are characterized by complexity and uncertainty; they require analysis of big data and usage of the latest technologies, and their solution could only be achieved in collaboration among large groups of participants from different fields and different countries. On the path towards global sustainable development [2], education is the basis for transforming and shaping possible options for the future of society by enhancing the balance between knowledge mosaic and global vision, individual priorities and social environment, immediate economic effect, and long-lasting consequences.

Educational models, approaches, and practices, to a large extent, still preserve traditions, values, and priorities of the past, which are not compatible with the SDG. Traditional approaches to learning and teaching have become ineffective and perhaps even counterproductive as the challenges and opportunities associated with transformations of learning and education extend beyond traditional thinking and strategies. Education in the digital age embodies an approach to learning that combines content with skills, makes use of digital technologies, and builds up abilities to analyze and integrate, rather than reproduce and remember. In the 21<sup>st</sup> century, along with knowledge and skills, competencies have become the most important acquisition and the result of education.

Evolutionary transformations [3] of education have been taking place along with industrial revolution stages as an attempt to react to knowledge and skills gaps in the workforce. The connection between educational and business models, as well as types and levels of technologies involved, is often considered a determinant for the stages of educational transformations, demonstrated by the rise of unified mass-scale education in connection with the 1<sup>st</sup> industrial revolution. However, the main difference between adapting education to the society's needs in the past and nowadays is in the understanding of the regimes, acquired competencies, and, as a result, a new social contract. In addition to mastering the key competencies of the 21st century [5, 6], educated people must be socially competent, adaptive, proficient in digital technology, and have a high level

of personal competence. Thus, education is a way of raising intellectually, socially, and emotionally strong people who are mindful of their health and personal development, participation in society, and maintaining their identity.

## **Problem Statement**

Despite extensive studies of the educational models, educational demands and transformations, as well as skills and competencies required for the future [7], there is a lack of common understanding of the changes necessary to implement education for sustainable development, its core elements and dependencies, and the role of technologies in the digital transformation of education.

*The purpose of this study is* to consider dependencies between educational elements to introduce a model of digital transformation for the education domain that will be helpful in guiding educational changes in a systematic way. For this purpose, the main elements that characterize education are identified, and their evolution through the stages of transformation is demonstrated. Then, the digital transformation models and approaches in business are analyzed, and a new approach to modeling transformation is suggested. The suggested digital transformation model enables tracing the changes in particular elements during the transformation and their effect on the demand for change in the related elements. Therefore, it could be used as a tool for retrospective analysis of educational transformation and a framework for planning the transformation for sustainable development.

## **Approaches of Investigation**

Most of the Digital Transformation (DT) research is focused on a specific way of changing business by incorporating ICT and other digital technologies. This change is aimed at achieving better operational efficiency by changing the business model, but it may also involve some modification of products or services to better meet the requirements and expectations of the customers.

In the business case, DT is considered a linear process of business change from its current state to the desired state within the period of time when other factors that influence its efficiency (such as economic, environmental, legislative, and related to customer demands, etc.) remain constant. Therefore, this process could be divided into some distinct phases, starting with an analysis of the current state and goal setting, then further continuing with planning of necessary interventions, development, and implementation of the desired business model. It is expected that the decisions made during this transformation project ensure the lasting competitiveness of the business. However, this approach may not work as expected in the case of dynamic environments, innovative technologies, or large-scale projects where participants are not bound by the same leadership.

As has been shown earlier, the changes in Education as a specific area are taking place incrementally and unevenly, and are often opposed or ignored by conservative people who do not take a risk of innovation unless it is critical. Educational transformations occur at different speeds and depths within a country and across countries, so the detailed planning of DT for the whole area in advance is counterproductive. The transformation model should take into account these irregularities and support continuous improvement of particular parts and components until a satisfactory level is reached.

The approaches to dealing with large systems projects and implementation demonstrate some similarities independent of the nature of these systems, such as a trend to substitute rigid hierarchical systems with distributed ones with different levels of self-regularity, or collecting user feedback for adaptation and personalization. One of them, the agile approach, first introduced as a new vision of software engineering for small projects, has further proved its efficiency in the case of large distributed systems and multiple teams [8].

The agile principles as declared in the Manifesto [9] emphasize deregulation in favor of flexibility, attention to customers, collaboration, and interaction. Expressed in general terms the idea of agility is in achieving certain flexibility to be able to adapt to changes inevitable in a dynamic environment. The flexibility relies on a system structure, provisions for incremental and iterative development (improvements, updates, adaptations), and collaboration that embraces customers into development teams.

The agile methodology expresses similar values and priorities to those of Education 4(5).0, i.e., the centrality of a client (learner), the need for adaptability, and co-creation (involvement in the process of obtaining the result). In [10], a detailed analysis of the agile principles and their reflection on teacher and learning methodology is discussed. In particular, the stress is made on collaboration as opposed to competition, the practicability of learning as opposed to formal theory and assessment, learners' involvement and freedom of choice, and adaptive teaching strategies for individual treatment.

Therefore, the agile principles may be applied to DT model development. The main components taking part in the DT are humans, business processes, and models/strategies.

## **Digital Transformation**

Technological breakthroughs in the field of information technology have caused competition between entities implementing traditional ways of doing business and innovators operating in the digital world. In a historically short period of time, the world has moved from the use of digital technology "to support" traditional business processes (calculations, communication, statistics) to a new reality in which the virtual (information) world is an integral part of the physical one. In this reality, the final de-

cision-making is still up to the human being, but the analysis and processing of data, the tasks of ongoing management and monitoring, as well as many other “intellectual” tasks are taken beyond his direct participation. This phenomenon is called “digital transformation”.

An analysis of the definitions of digital transformation [11–13] demonstrated that this concept is associated with processes that differ in specific goals, in their implementation, and the objects to which they are applied. However, their common background is their purpose corresponding to the implementation of progressive changes using various digital technologies (computer, information, intelligent, mobile, communication, etc.). For comparison, here are two definitions of digital transformation: the first focuses on the business efficiency of the organization, and the second emphasizes the creation of a new entity as a result of using the capabilities of physical and digital systems.

“Digital transformation is the use of technology to radically improve the performance or reach of an organization. In a DT business, digital technologies enable improved processes, engaged talent, and new business models” [14].

“Digital transformation is characterized by a fusion of advanced technologies and the integration of physical and digital systems, the predominance of innovative business models and new processes, and the creation of smart products and services.” European Commission (2019) [15].

According to [16], the basis of the DT process is technologies, which, on the one hand, cause new needs and expectations of users (*disruptions*), requiring a response (action) from the organization, and on the other hand, form the basis and support of changes. DT requires the development of a *model and strategy* for implementing such changes, which ensures the formation of a *new business strategy* based on Value Chain analysis – a way to achieve results using the organization’s resources under the current business organization model. Transformations concern both *structural changes* (organizational structure, roles and responsibilities, leadership style) and *processes* associated with the production of a product or obtaining a result. DT often faces *obstacles* in the form of inertia – lack of support and direct resistance to innovation, and, despite the positive effect, it can carry certain risks.

Research aimed at the identification of the specific topics studied in relation to the DT [12] identified three focus areas that can be described as follows:

- human factors: workforce & human potential, skills and competencies of personnel, potential and acceptance of changes, Leadership at different levels, interaction, stakeholders, and owners’ prospects;
- business factors related to logistics and operational processes, management and data collection, marketing, etc., specific to a particular area;
- technology and information, which form the basis of the proposed changes, and ensure the ability to quickly analyze data, communicate and collaborate online, manage, and forecast.

In the field of higher education, the immediate disruptions are associated with a need for innovations in the educational processes and new economic models for obtaining education. Students' experience in using the latest technologies, such as virtual and augmented reality, gamification, elements of artificial intelligence, and personalization tools, creates certain expectations about the education delivery models [17–20]. To see a broader picture of the changes in education brought not only by technologies related to learning, instruction, and assessment but also by the evolution of society, we further consider the evolution of the educational goals.

## **Educational Transformations. Evolution of Educational Goals**

To better understand changes in learning and education, it is useful to look at how the goals of education are transforming from “mastery of knowledge” to “mastery of oneself through knowledge” [2].

Education performs a function that enables achieving four universal goals at any stage of development for any society:

- to provide for finding a suitable job and thereby obtain a chance to *participate* in society,
- to use and develop *personal abilities* and exchange “*talents*”,
- to *make decisions* based on the individual's awareness,
- to build and maintain one's *identity* based on one's own traditions and the wide variety of traditions around.

These four goals of education remain constant over time – much like the universal “hierarchy of needs” [7], which demonstrates progress from physical needs through safety and social needs, to respect and knowledge, and culminates in self-actualization and self-realization. However, the ways these four universal needs are satisfied vary greatly at different times and in different societies. The first educational goal in this comparison could be interpreted as a basic, “survival” need, the second, as the way to socialization and self-development, after that comes the one for leadership and responsibility, and finally, reaching a harmony with oneself and the world.

Mass-scale education (a non-discriminative education for all) [4] used to focus on achieving the first goal through knowledge, skills, and competencies provided for learners to tackle the tasks they face during their lives. Certainly, one of the main educational goals is to help people understand the times and society in which they live and find solutions to technical, economic, and social problems using relevant technology. Not long ago, educators could expect that whatever was taught would stay with the students for their lives. Nowadays, educational institutions must prepare students for economic and social changes happening faster than ever before, to use emerging technologies and solve arising problems that were unknown in the past. Therefore, besides learning “from the past” – from knowledge and experience in a specific field, there should be learning

“for the future” – learning to be prepared for future challenges. A schematic view of major educational changes is presented in Table 1.

As one can see, incremental changes in each of the features have led to significant revisions of the learning process, which has been gradually becoming engaging, participatory, and inclusive. Growing independence of the learners and their involvement in the learning process, as well as the development of self-regulation skills, provides a framework for successful learning throughout life. Instructional strategies evolve to support individual learning preferences and talents, preserving the achievements of project-based learning by balancing competitiveness with teamwork, learning from peers, and collaboration arranged around the group projects.

The choice of features to describe the educational model at different stages is determined by the need to emphasize the changes that characterize each new stage. These changes can be quantitative, as in the case of the use of technology or collaboration, or qualitative, as in the case of a learning environment demonstrating that the models of education have grown beyond the school limits to support learning anytime and anywhere. However, the main value of this comparison is in revealing the hidden links between the desirable result of the education and the methods used to achieve it.

If the goal of education is to prepare someone for a regular job, such as an industrial worker, then a drill and practice approach focusing on stu-

Table 1. Transformation Education from 1.0 to 4.0

Features	Version of Education			
	1.0	2.0	3.0	4.0
Learning environment	Classroom	Elements of blended learning	Flipped classroom	Personalized
Instructional strategy	Lecturing Drills and practice	Elements of experiential learning	Student-centered learning	Peer learning, problem-based learning
Collaboration	Almost none	Limited collaboration	Collaborative learning	Social learning
Assessment	Formal testing	Tests and activities	Individual and team projects	Competency-based
Technology	None	Limited use	Integrated in the educational process	Immersive experience
Teacher's role	Authoritative, transmitting knowledge	Supervision and support	Guidance and mentoring	Arranging learning experience
Learner's role	Absorb the information	Interaction and engagement	Search, select, integrate information	Take a responsibility and make decisions

ing the person with facts, rules, and procedures may be sufficient and effective. However, if the goal is to support someone's creativity, unfold capabilities and individual talents, expecting a fresh look, out-of-the-box thinking, and innovative solutions, then the old school approach will not work. Thus, although subject-related knowledge and skills are still needed, a set of target competencies that one should acquire through education has changed considerably. Further, these new competencies are described, as well as their role in the implementation of sustainable development goals.

**Competencies for SDG - 21<sup>st</sup> century skill.** Education in the 21<sup>st</sup> century is focused on four important areas [17], namely:

- Knowledge – general and digital literacy, basic and contemporary knowledge;
- Practice – skills and competencies, enabling the application of the acquired knowledge;
- Character – personality, determining our behavior and interaction with the world;
- Learning to learn – reasoning, self-development, and adaptation.

Together, they constitute the space for implementation of all educational goals [21, 23]. The first two provide the basis for employability, which is also supported by learning and adaptability acquired within the fourth area. The third area supports most, if not all, goals of education, facilitating the development of skills for individual and collaborative decision-making and self-regulation, as well as competencies necessary for advancing in new physical and cultural environments, preserving personal identity.

To address the needs of the Education of 21<sup>st</sup> century an innovative framework has been adopted in Singapore [23]. This framework identifies a set of core values and competencies deemed necessary to better prepare students for the future and presents them in a way that unfolds through education, thus supporting the creation of the new curricula and assessment. The framework is intended for school children (from pre-school to post-secondary), thus its core focuses on the upbringing and character-building aspects. The core values include respect, responsibility, resilience, integrity, care, and harmony. The core provides a basis for social-emotional competencies, which are necessary to manage and position oneself in society. The respective skills are necessary to handle challenges, manage emotions, develop responsibility, build relations with others, and identify one's role and place in society. Based on that, the next set of competencies equips young students with skills to advance in highly dynamic, technology-rich, and culturally diverse environments. They include basic skills and awareness in civic, global, and cross-cultural domains (Literacy); a set of skills needed for dealing with information, communication, and collaboration (Collaboration); and Cognitive skills, including critical thinking, innovative and inventive thinking, and the ability to adapt to the situation and environment in problem-solving. Altogether, this frame-

work guides the raising of a confident person, a self-directed learner, a concerned citizen, and an active contributor.

More attention is being paid to skills and competencies to be developed at the HE level.

SDG outlined new problems requiring innovative approaches to their solution and thus new competencies, i.e., proficiencies and abilities based on knowledge, skills, and behavior relevant to attaining the goal. A recognized list of competencies includes: creativity, critical thinking, communication, collaboration, leadership and responsibility, self-regulation, and lifelong learning. When analyzing competencies for sustainable development, many researchers focus on skills associated with them. The levels of detail in the description of these skills vary, so several frameworks were proposed, with different principles of grouping.

In [24], digital literacy skills are gathered in a separate group, whereas the other two groups cover the rest. One of them contains so-called learning skills which are important for professional development, and another – a variation of self-management and collaborative skills (named life skills), as listed below:

- learning skills (creativity and innovation, critical thinking, and problem-solving; communication and collaboration);
- literacy skills (information literacy, media literacy, and ICT literacy);
- life skills (flexibility and adaptability; initiative and self-direction; social and intercultural skills; productivity and accountability; leadership and responsibility).

Another framework [22] suggests a better balanced grouping of competencies clustering those related to self-development and collaboration (inter-personal and intra-personal), cognitive and meta-cognitive (comprising learning, cognition, and understanding), as well as civic and social for a global positioning, and digital related to the activities in the technology-intense environment.

For curricula planning, it is important to discern professional competencies related to the knowledge and skills in a specific application area, such as accounting or pharmacy, and general *transversal* competencies, which are not specific to any field but are considered valuable for most activities. The transversal competencies include Language, Thinking (cognitive), Self-management, Social and communication, and Life competencies [25]. For some reason, this framework implicitly highlights language skills and ignores digital competencies, which are probably taken for granted as obtained through basic literacy.

A perception of the importance of specific and generic skills among employers and graduates was a topic of a longitudinal study [26–28]. Although the division between the generic and specific sets of skills differs from the previously mentioned analysis of transversal and specific competencies, it allows tracing back the important components of the curricula. In this research, the generic group includes the ability to interpret complex situations, to adapt to the communication environment for successful

collaboration, to think out of the box, to operate in unknown situations and different cultural settings and contexts, to understand data-based reasoning, to interpret and generate media content persuasively, to understand concepts across multiple disciplines, to overcome cognitive load by using various tools, to transform tasks into actions adjusted to the work environment, and to collaborate virtually and engage large communities. The second group includes skills considered specific in the context of the sphere of employment, such as diversity management and social skills, professional background skills (formal education and work experience), as well as self-management and IT skills. The results of the study show that background skills are becoming less relevant for employability, whereas the skills from the generic group are considered to carry more weight in the evaluation for some work positions.

Although work experience and formal education have become less relevant for employability [29], this means that other important competencies were not in demand previously and thus were not addressed by the educational programs.

Twenty-first-century learning embodies an approach to learning that combines knowledge with skills and the formation of a systemic understanding rather than the collection of knowledge from the studied disciplines. It implies a learner's curiosity about advances in the field, new approaches, methods, and technologies to stay relevant, and the ability not only to integrate innovations but also to produce them. This requires learning and innovation skills — these are what separate trainees who are prepared for the more challenging work environments of today's world from those who are not. These skills include: creativity and innovation, critical thinking, problem solving, communication, and collaboration.

There is no doubt that two core skill sets — the ability to quickly acquire and apply new knowledge — will remain on the list of requirements for any job.

Achieving the goals of education in the 21st century is determined by the availability of digital technologies for communication, collaboration, and learning. Know-how to apply core skills — problem solving, communication, teamwork, technology, innovation, etc. — ability to use on every project (job).

**MetaSkills.** To make learning relevant, personalized, and engaging, to engage learners through skills (life and vocational, learning and innovation, information and technology), knowledge (21st century core subjects and cross-cutting themes), and relevant technologies, learning activities require an expansion of the existing educational development model.

And since the problems are associated not only with limited resources and funds, but also with the way teachers teach and how training is organized. Students must learn deeper and broader, beyond the “3R paradigm (the concept of 3R — recall, retrieve, refine) and traditional tests. They should have the opportunity not only to master the learning content of-

ferred to them, but also to understand how they can expand and produce new knowledge themselves, using the the potential of modern digital technologies. In other words, move from 3R to 4C and an independent search for obtaining the missing knowledge. To do this, use communication, collaboration, critical thinking and problem solving, creativity, and innovation, that is, to go from 3R to 4C (communication, collaboration, critical thinking, creativity) [9, 10, 29, 30]. The role of the teacher is to help them with this.

The 4C skills are the key to helping learners achieve a deep understanding of knowledge and are essential to facilitating the transfer of learning to a digital environment. These skills are inextricably linked to content knowledge, since it is impossible to teach skills independently of the content knowledge base — for example, it is impossible to think critically about anything. In the digital age, knowledge and skills develop together in such a way that the knowledge students use in the classroom becomes a source of creativity, a subject for critical thinking and communication, and an incentive for collaboration. At the moment when skills (communication, cooperation, the ability to use the potential of new technologies) “work” with new interdisciplinary knowledge (computer science, bioengineering, modern manufacturing, etc.), students interact in a global network of economic, technological, social and ecological relationships (and this is the main thing, this did not happen in the 20th century). Learning is becoming hybrid.

**Self-development and grouping.** Self-development is the process of acquiring new skills and knowledge for the purpose of self-improvement. In recent years, countries have been increasing investment in education, and as a result, more and more students are gaining access to digital technologies in educational institutions, at home, and in community centers around the world. This provides new opportunities for learning and skill development. Digital technologies are a powerful tool for developing personal abilities (self-improvement) and sharing “talents” in a group. Ensuring universal access to technological tools and closing the digital divide provides learners with more opportunities to realize their potential [12]. Grouping — learning from others. You can learn self-development by being in the same group with students who have experienced this before. These learners tend to be knowledgeable about the process of self-development in different contexts.

**Purposeful development** of information technologies in the field of quick decision-making. Through the range of social networks and instant messengers, human potential for informed participation in decision-making has never been so successful. Learning to work digitally, harnessing the power of social media to solve a problem together in a community, and applying the critical thinking and information literacy skills needed to effectively use the wealth of information available are clear challenges for the 21st century. In many cases, learners are just beginning to understand how to use the information around them. Digital technologies have made

it easier to connect with those who share interests (social media) and also coordinate learning activities.

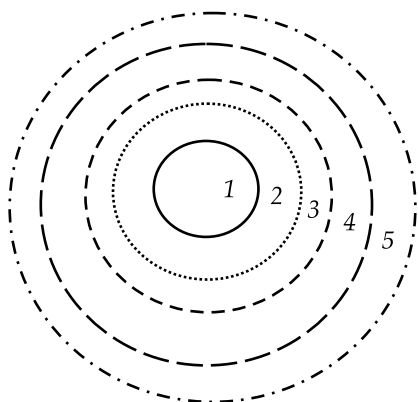
**Culture.** In the digital age, one of the in-demand skills is the ability to connect traditional and interdisciplinary knowledge, which provides an incentive to create and use new knowledge, services, and technologies. Increased mobility, immigration, and access to job opportunities around the world have led to yet another type of connection and addition—communities around the world are becoming increasingly culturally diverse. The challenge for each individual is to build and maintain his identity based on his own traditions and the wide variety of traditions around him (the task of maintaining social harmony).

So, if earlier the achievement of the learning goal consisted in the fact that the student must adapt to new living conditions, new work requirements (a person went into the environment), then with the change in technologies, methods, and models of updating knowledge, the achievement of learning goals also changes. This is an adaptation to various “social scenarios” (an intellectual environment rich in resources provides its capabilities to the learner through interactive technology using intellectual content). In all of these cases, digital technologies, infrastructure, and platforms can be critical, but they are tools, not ends in themselves. There needs to be a chain that connects digital and technological knowledge with social and emotional skills.

Digital technologies are driving huge changes in the way we communicate and interact with each other, and increasingly in the way we learn and solve problems. Thanks to the use of digital technologies on the one hand and various types of learning activities on the other (i.e., the ultimate combination of technological and didactic aspects), learners can access learning anytime and anywhere. Rethinking the goals of education in the digital age, learning must be organized in such a way as to *understand* that today a greater harmony with the environment (society) is required, and this requires new scientific knowledge, competencies, and technologies.

## DT Model

Following the agile principles, the core of the model is represented by the stakeholders of the digital transformation of Education. Thus, the core is represented by those who are involved in the transformation and benefit from it. Taking into account that the same person could play one or several roles from a set  $R$  (a learner, a teacher, a supervisor, a developer, an administrator, a manager, an owner of an educational business, an employer) simultaneously depending on the scenario, we further refer to the role when discussing the transformation or use the term “user” where appropriate. One should keep in mind that a learner could be considered a recipient of an educational service, in which case his satisfaction with the service as a client is a measure of its quality. On the other hand, a learner is a product of the educational process, whose features are eva-



The layers of the DT model:

- 1 – Core – stakeholders involved in development and implementation
- 2 – Goals, plans, ideas, concepts, strategies
- 3 – Business implementations, processes, and structures
- 4 – Technologies and information space
- 5 – Institutionalization of norms, values, culture, and traditions of the new reality

Fig. 1. DT Model

lated by a potential employer – competencies, values, attitudes, views, and abilities. According to agile methodology, Stakeholders are involved in setting requirements in a collaborative way, evaluating intermediate and final results, providing feedback, and participating in the process implementation.

Therefore, the next layer contains a transformation framework represented by a concept, a hierarchy of goals, as well as related ideas, plans, and strategies. It describes a current model of Education, the purpose and expected results of the digital transformation, and outlines the approaches to its implementation. This is the source of the specific, and the starting point analyzed and corrected.

The next layer corresponds to the business structure and processes affected by the transformation. In the case of Education, it corresponds to the educational organizations as providers of educational services, producers of educational content, certification and accreditation agencies, on the one hand.

A learner as a product is formed by an instructional process arranged by a teacher personally or through intelligent learning content as an implementation of instructional strategies; therefore, the model components closest to the core would be “instructional strategies”, “learning content”, and “learning environment” within which teaching and learning occur.

The next layer is represented by supportive tools and resources necessary to populate the learning environment, to develop learning content, to support assessment and learning analytics, etc. Finally, the outer layer determines culture, values, and norms that regulate the application of digital and non-digital instructional and learning processes and the recognition of their results.

The model in Fig. 1 could be used to describe the Education state. For instance, Education 1.0 may be described as follows:

- Learning environment: a classroom setting for unified group learning, a laboratory;
- Teaching strategy: “knowledge-transfer” through lecturing, non-differentiating;

- Assessment: test-based, 3R type;
- Learner: passive recipient;
- Learning content: textbook;
- Learning strategy: memorization, repetition, reproduction;
- Culture and Values: following the guidelines, obedience, perfection, teacher as an ultimate authority, organizational regulations, and documented process.

## Conclusion

As a result of the discussion, a new model for digital transformation of education to achieve sustainable development goals was proposed. This model takes into account the input of stakeholder communities and an assessment of the current state of transformation. This allows for the parallel development of tasks and the of the current state of transformation. The model is built taking into account the dynamics of the environment in which change occurs and the network (decentralized) connections between participants. The model demonstrates the principles of the SDGs in action – collaboration in the development of solutions and the implementation of technologies, a balance between local innovation implementation plans and centrally supported strategic directions.

## REFERENCES

1. 17 Goals to Transform Our World. URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment> [Accessed 08 Sep. 2025]
2. Report on the 2022 Transforming Education Summit, Convened by the UN Secretary-General January 2023, 49 p. URL: [https://www.un.org/sites/un2.un.org/files/report\\_on\\_the\\_2022\\_transforming\\_education\\_summit.pdf](https://www.un.org/sites/un2.un.org/files/report_on_the_2022_transforming_education_summit.pdf) [Accessed 08 Sep. 2025]
3. Gritsenko V.I., Manako A.F., Sinitsa E.M. Digital Transformations and Mass Continuous Learning. *Control Systems and Computers*, 2018, Vol. 277 (5), 47–61. <https://doi.org/10.15407/usim.2018.05.047>
4. Defining Education 4.0: A Taxonomy for the Future of Learning. *World Economic Forum*, Jan. 2023, URL: [https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Defining\\_Education\\_4.0\\_2023.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_Defining_Education_4.0_2023.pdf) [Accessed 08 Sep. 2025]
5. *UiTM Academic Compass. Education 5.0 @ UiTM. Navigating the Future*. Academic Affairs Division, UniversitiTeknologi MARA, 2019, 95 p. URL: [https://penang.uitm.edu.my/images/hea/EDU5.0/Education\\_5\\_at\\_UiTM\\_-\\_UiTM\\_Academic\\_Compass\\_352019-min.pdf](https://penang.uitm.edu.my/images/hea/EDU5.0/Education_5_at_UiTM_-_UiTM_Academic_Compass_352019-min.pdf) [Accessed 08 Sep. 2025]
6. Grytsenko V.I., Kudriavtseva S.P., Synytsya K.M. Learning Task Models in the Context of Education for Sustainable Development. *Control Systems and Computers*, 2020, Vol. 289 (5), 3–16. <https://doi.org/10.15407/csc.2020.05>
7. *Four-Dimensional Education*. The Center for Curriculum Redesign, Boston, 2015, 121 p. URL: [https://www.researchgate.net/publication/318430582\\_Four-Dimensional\\_Education](https://www.researchgate.net/publication/318430582_Four-Dimensional_Education) [Accessed 08 Sep. 2025]
8. Maslow A.H. Higher needs and personality. *Dialectica*, 1951, Vol. 5 (3–4), 257–265. <https://doi.org/10.1111/j.1746-8361.1951.tb01056.x>
9. Hohl P., Klünder J., van Bennekum A., Lockard R., Gifford J., Münch J., et al. Back to the future: origins and directions of the “Agile Manifesto” –views of the originators. *Journal of Software Engineering Research and Development*, 2018, Vol. 6 (1), 15. <https://doi.org/10.1186/s40411-018-0059-z>

10. What is a 21st century education? URL: <https://www.battelleforkids.org/Insights/learning-hub-item/what-is-a-21st-century-education>. [Accessed 08 Sep. 2025]
11. Education in the 21<sup>st</sup> century – think strategy. URL: <https://thinkstrategicforschools.com/education-21st-century> [Accessed 08 Sep. 2025]
12. Delors J. et al. *Learning: The treasure within*. UNESCO, Paris, 1996. 266 p. URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000109590> [Accessed 08 Sep. 2025]
13. Verina, N., Titko, J. Digital Transformation: Conceptual Framework. *The 6th International Scientific Conference Contemporary, Issues in Business, Management and Economics Engineering*, 2019. 721–724. <https://doi.org/10.3846/cibmee.2019.073>
14. Development: The 8 Ways You Need to Start Working on It. URL: <https://www.clockster.com/az/blog/self-development> [Accessed 08 Sep. 2025]
15. Digital transformation. URL: [https://reform-support.ec.europa.eu/what-we-do/digital-transition\\_en](https://reform-support.ec.europa.eu/what-we-do/digital-transition_en) [Accessed 15 Jun. 2025]
16. Vial G. Understanding digital transformation: A review and a research agenda. *Managing digital transformation*, 2021,13–66. <https://doi.org/10.4324/9781003008637-4>
17. Gillpatrick T. Innovation and the digital transformation of education. *The Journal of Limitless Education and Research*, 2020, Vol. 5 (3), 194–201.
18. Holmes W., Bialik M., Fadel C. *Artificial Intelligence in Education – Promises and Implications for Teaching and Learning*. Independently published, Boston, 2019.
19. *AI for Learning*. Carmel Kent, Benedict du Boulay, 2022, Publisher CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003194545>
20. Ouyang, F., Jiao, P. Artificial Intelligence in Education: The Three Paradigms. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, Vol. 2, Article 100020. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2021.100020>
21. Binkley, M. et al. Defining Twenty-First Century Skills. In: Griffin, P., McGaw, B., Care, E. (eds) *Assessment and Teaching of 21st Century Skills*. Springer, Dordrecht, 17–66. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-2324-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-94-007-2324-5_2)
22. The Partnership for 21st Century Skills. URL: <https://www.teacherpowered.org/guide/resources/partnership-21st-century-skills> [Accessed 08 Sep. 2025]
23. 21st Century Competencies. URL: <https://www.moe.gov.sg/education-in-sg/21st-century-competencies> [Accessed 08 Sep. 2025]
24. OECD. An OECD Learning Framework 2030. In: Bast, G., Carayannis, E.G., Campbell, D.F.J. (eds) *The Future of Education and Labor*. Arts, Research, Innovation and Society. Springer, Cham, 2019. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-26068-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-26068-2_3)
25. Gog T., Kester L., Nievelstein F., Giesbers B., Paas F. Uncovering cognitive processes: Different techniques that can contribute to cognitive load research and instruction. *Computers in Human Behavior*, 2009, Vol. 25 (2), 325–331. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2008.12.021>
26. Artuz J.K.A., Roble D.B. Developing students' critical thinking skills in mathematics using online-process oriented guided inquiry learning (O-POGIL). *American Journal of Educational Research*, 2021, Vol. 9 (7), 404–409. <https://doi.org/10.12691/education-9-7-2>
27. Irwanto I., Saputro A.D., Rohaeti E., Prodjosantoso A.K. Promoting critical thinking and problem solving skills of preservice elementary teachers through process-oriented guided-inquiry learning (POGIL). *International Journal of Instruction*, 2018, Vol. 11 (4), 777–794.
28. Liebowitz J., Frank M. (Eds.). *Knowledge management and e-learning*. CRC press, 2016, 367 p. <https://doi.org/10.1201/b10347>
29. Transformative Competencies for 2030. URL: [https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/about/projects/edu/education-2040/concept-notes/Transformative\\_Competencies\\_for\\_2030\\_concept\\_note.pdf](https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/about/projects/edu/education-2040/concept-notes/Transformative_Competencies_for_2030_concept_note.pdf)
30. *Reimagining our futures together. A new social contract for education*. Report from the international commission on the futures of education UNESCO, 2021, 188p. <https://doi.org/10.54675/ASRB4722>

Received 10.09.25

С.П. КУДРЯВЦЕВА, канд. техн. наук, старш. наук. співроб., пров. наук. співроб.,  
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,  
просп. Акад. Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна  
<https://orcid.org/0000-0003-0450-3388>  
svetaa@irtc.org.ua

О.Є. ВОЛКОВ, канд. техн. наук, старш. дослідник, директор,  
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,  
просп. Акад. Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-5418-6723>  
alexvolk@ukr.net

К.М. СИНИЦЯ, канд. техн. наук, старш. наук. співроб., пров. наук. співроб.,  
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,  
просп. Акад. Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-7417-1748>  
ksynytsya@irtc.org.ua

Є.А. САВЧЕНКО-СИНЯКОВА, канд. техн. наук,  
старш. наук. співроб., пров. наук. співроб.,  
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,  
просп. Акад. Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна  
<https://orcid.org/0000-0003-4851-9664>  
savchenko\_e@meta.ua

## МОДЕЛЬ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ЗАДЛЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ОСВІТИ

**Вступ.** Освіта задля сталого розвитку (ОЗСР) відповідає реалізації Цілей сталого розвитку, зокрема Цілі 4 «забезпечення якісної доступної освіти для всіх». Перехід від традиційної освіти до ОЗСР потребує значних змін не тільки у змісті навчання, але й у стратегіях та методах навчання та тренування, що пов'язано зі зміною головної мети навчання — від опанування знань та навичок минулого до навчання та підготовки до розв'язання нових, комплексних та мультидисциплінарних проблем, зокрема, шляхом роботи в групі. Така підготовка також потребує розвиненої технологічної підтримки, тому трансформацію традиційної освіти в освіту задля сталого розвитку доцільно здійснювати під час цифрової трансформації. Під цифровою трансформацією зазвичай розуміють перехід до інтенсивного застосування інформаційно-комунікаційних технологій з метою підвищення ефективності виробництва, керованості процесів, спрощення адміністрування, розширення клієнтської бази або запровадження нових продуктів чи сервісів. Досліджені моделі цифрової трансформації стосуються здебільшого окремих організацій, які централізовано переходять до нових умов функціонування. Оскільки ОЗСР призводить до змін у системі цінностей та культурі суспільства, бажаним є залучення представників зацікавлених спільнот до планування, реалізації та оцінювання результатів цифрової трансформації на кожному етапі. Таким чином, потрібно створення нової моделі.

**Метою статті** є розгляд залежностей між освітніми елементами для запровадження такої моделі цифрової трансформації в освітній сфері, яка буде корисною для систематичного управління освітніми змінами. Для цього визначено основні елементи, що характеризують освіту, та продемонстровано їхню еволюцію протягом етапів трансформації.

**Методи дослідження** полягають у визначенні основних характеристик ОЗСР у порівнянні з традиційною моделлю освіти та створенні гнучкої моделі трансформації освіти для досягнення цілей сталого розвитку з застосуванням цифрових технологій для організації освітніх процесів, підтримки пізнавальної діяльності, розроблення інтерактивного навчального контенту тощо.

**Результати.** Запропоновано нову модель цифрової трансформації освіти для досягнення цілей сталого розвитку, яка враховує внесок зацікавлених спільнот та оцінку поточного стану трансформації, що дає змогу паралельно відпрацьовувати завдання та оцінювати поточний стан трансформації, які описують різні її етапи, враховуючи зміни технологій і нормативної бази, а також планувати тренінги для учасників трансформаційних процесів. Визначено елементи, які відрізняють ОЗСР від інших моделей.

**Висновки.** Модель побудовано з урахуванням динаміки середовища, в якому відбуваються зміни, мережевих (децентралізованих) зв'язків між учасниками. Окрім цього, модель демонструє принципи ОЗСР у дії — співпрацю у підготовці рішень та впровадженні технологій, баланс між локальними планами впровадження інновацій та стратегічними напрямками, що підтримуються централізовано.

**Ключові слова:** *цифрова трансформація, цілі сталого розвитку, модель освітньої трансформації, гнучкий підхід.*

---

# AUTHOR GUIDELINES

The journal publishes the results of research in the field of computer science, information technologies and systems and their applications in various fields of activity, system analysis, intelligent control, cyber security, biological and medical cybernetics, digital economy and learning in the digital age, etc.

Target audience – scientists, engineers, graduate students and students of higher educational institutions of the relevant specialty.

## Requirements for manuscripts

1. The manuscript is accepted in electronic form, if possible – on paper in one copy (language of the article – English (*in priority*) or Ukrainian, manuscript up to 30 pages). The manuscript should contain:

- information about the Authors in English and Ukrainian: Full name, Academic Degree, Academic Title, Position, Affiliations, Postal address of the organization, Direct links to author's ORCID (if necessary, Researcher ID) and E-mail, Author-correspondent and their telephone number (*for contacting the editor*);

- Short Abstract with keywords in paper language, and Extended Abstract with keywords in either Ukrainian for English-language paper or English for Ukrainian-language paper. The text of the Extended Abstract is not less than 1800 characters with spaces, by headings: *Introduction, The purpose of the paper, Methods, Results, Conclusions, Keywords* (5–8 words);

- *REFERENCES* – a list of sources in English in the order of mention in the text. For Non-English-language sources, citation are translated, the original language is indicated in square brackets, for Ukrainian-language papers information about authors and the title in the original language is given. Examples for design of the References is given below;

- *LITERATURE* – a list of sources in Ukrainian do not use for English-language papers;

- if desired, the authors provide information about the grant or financial support of the research;

- the license agreement is signed automatically when the submission is created in the electronic editorial system.

2. The text of the article should be submitted with the following mandatory headings: *Introduction, Problem Statement / Problem Definition, Objective, Results, and clearly formulated Conclusions*.

## Requirements for the text file

File format: \*.doc, \*.rtf. Applicable styles: Times New Roman font, 12 pt, without a hyphen for a line break, line spacing – 1.5. Paper size: A4, all sides – 2 cm.

Formulas are typed in Formula Editors (preferably Microsoft Equation Editor 3.0. and MathType 6.9b.) Formula Editor options are (10.5; 8.5; 7.5; 14; 10). **The width of formulas is up to 12 cm.**

Figures must be of high quality, they are provided in separate files of appropriate formats (\*.png, \*.jpg, \*.tiff, etc.). **The width of the figures is up to 12 cm.**

Tables are created using a standard text editor built into the Table toolkit. **The width of the table is up to 12 cm.**

---

# КЕРІВНИЦТВО ДЛЯ АВТОРІВ

В журналі друкуємо результати досліджень у сфері інформатики, інформаційних технологій та систем і їх застосувань у різних сферах діяльності, системного аналізу, інтелектуального керування, кібербезпеки, біологічної та медичної кібернетики, цифрової економіки та навчання в цифрову епоху тощо.

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

## Вимоги до рукописів статей

1. Рукопис приймаємо в електронному виді, за можливості — на папері в одному примірнику (мова статті — англійська (*в пріоритеті*) або українська, рукопис до 30 стор.). Рукопис має містити:

- відомості про авторів англійською та українською мовами: ПІБ, науковий ступінь, вчене звання, посаду, місце роботи, поштову адресу організації, прямі посилання авторських ідентифікаторів ORCID (за потреби *Researcher ID*) та *E-mail*, автор-кореспондент із номером телефону (*для зв'язку з редактором*);

- коротку анотацію з ключовими словами мовою статті та розширену анотацію з ключовими словами українською для англійської статті або ж англійською для українськомовної статті. Текст розширеної анотації не менше 1800 знаків з пробілами, за рубриками: *Introduction / Вступ, The purpose of the paper / Мета роботи, Methods / Методи, Results / Результати, Conclusions / Висновки, Keywords / Ключові слова* (5–8 слів);

- *ЛІТЕРАТУРА* — перелік джерел для українськомовних статей українською мовою оригіналу в порядку згадування в тексті, для неукраїнськомовних джерел посилання даються англійською, в квадратних дужках вказується мова оригіналу;

- *REFERENCES* — перелік джерел англійською мовою в порядку згадування в тексті. Для неанглійськомовних джерел в квадратних дужках вказується мова оригіналу, для українськомовних після двокрапки наводиться інформація про авторів та назва джерела мовою оригіналу. Приклади оформлення переліку посилань наведено далі;

- за бажанням автори надають інформацію про грант або фінансову підтримку дослідження;

- ліцензійний договір підписується автоматично при створенні подання в системі електронної редакції.

2. Текст статті подають з обов'язковими рубриками: *Вступ, Постановка завдання/Окреслення проблеми, Мета, Результати, чітко сформульовані Висновки.*

## Вимоги до текстового файлу

Формат файлу \*.doc, \*.rtf. Застосовні стилі: шрифт Times New Roman, 12 пт, без переносів, міжрядковий інтервал — 1,5. Формат паперу А4, всі береги — 2 см.

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

**Ширина формул — до 12 см.**

Рисунки мають бути якісними, їх надають окремими файлами відповідних форматів (\*.png, \*.jpg, \*.tiff тощо). **Ширина рисунків — до 12 см.**

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

---

## Examples for design of the References

### REFERENCES

#### The Books

1. De Vooght E. *Learning to think critically*. Academia Press, Gent , 2025, 168 p. [In Dutch]
2. Ustymenko V.A. *Adaptation of national legislation to EU law: foundations, criteria, sustainability degree*. Akadempriodyka, Kyiv, 2025, 452 p. [In Ukrainian: Устименко В.А. Адаптація національного законодавства до права Європейського Союзу: основи, критерії, виміри стійкості]
3. Divan M. J., Johri P., Guim F., Shchemelinin D., Carranza M. *Advances in Image Processing, Reliability, and Artificial Intelligence*. Elsevier, 2025.
4. *Department of Informatics of NAS of Ukraine. Historical and Biographical Directory*. Akadempriodyka, Kyiv, 2017, 286 p. [In Ukrainian: Відділення інформатики НАН України. Історико-біографічний довідник. Академперіодика]

#### Papers in Periodicals / Статті в періодичних виданнях

5. Zhuoqun Xia, Longfei Huang, Jingjing Tan, Yongbin Yu, Wei Hao, Kejun Long. A lightweight intrusion detection system for connected autonomous vehicles based on ECANet and image encoding. *Journal of Information Security and Applications*, Elsevier, 2025, Vol. 92 (7), Article 104082.  
<https://doi.org/10.1016/j.jisa.2025.104082>
6. ZagorodnyA. G., Khimich O. M., Andon F. I., et al. Implementation of European principles of open science in the National Academy of Sciences of Ukraine. *Visnik Nacionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*, 2025, Vol. 1, 11–33.

#### Conferences Materials

7. Neumannova A. Organizational Culture and Digital Resilience: Competing Values Perspective. *17th IADIS International Conference Information Systems*, Porto, Portugal, 2024, 158-162. URL: <https://www.iadisportal.org/digital-library/organizational-culture-and-digital-resilience-competing-values-perspective> [Accessed 20 May. 2025]
8. Husna B. A., Munir R. 3D Traffic Scenes Reconstruction for Autonomous Vehicles Using Gaussian Process Latent Variable Model (GPLVM). *11th International Conference on Advanced Informatics: Concept, Theory and Application (ICAICTA)*, Singapore, Issue 1, 2024, 1-6.  
<https://doi.org/10.1109/ICAICTA63815.2024.10763077>

#### Electronic Sources

9. Information for Authors of Springer Computer Science Proceedings: Instructions for proceedings authors (pdf). URL: <https://resource-cms.springernature.com/springer-cms/rest/v1/content/19242230/data/v17> [Accessed Mar. 2025]
10. Cyrillic Gap Analysis. W3C Group Draft Note 02 April 2025. URI: <https://www.w3.org/TR/cyrl-gap/> [Accessed 26 Jun. 2025]

---

## Приклади оформлення

### ЛІТЕРАТУРИ за ДСТУ 8302:2015 для українськомовних статей

#### Книги

1. Єгоров І.Ю., Никифорок О.І. Цифрові технології в інноваційній трансформації економіки України: колективна монографія. Київ : НАН України, ДУ «Інститут економіки та прогнозування НАН України», 2020. 308 с.
2. Апанасенко Г.Л., Попова Л.А. Медична валеологія. Київ: Здоров'я, 1998. 246 с.
3. Людський розвиток в Україні: трансформація рівня життя та регіональні диспропорції: у 2-х т.: кол. моногр. Київ, 2012. 436 с.

#### Розділ книги

4. Корнацький В.М. Проблема здоров'я в умовах війни. В кн.: Стрес і серцево-судинні захворювання в умовах воєнного стану. Київ: ДУ «Національний науковий центр «Інститут кардіології, клінічної та регенеративної медицини імені академіка М.Д. Стражеска НАМК України», 2022. С. 5–23.

#### Статті у періодичних виданнях

5. Сидоренко Ю.В., Шалденко О.В. Вагові політочкові перетворення при моделюванні можливих результатів пластичної хірургії. Сучасні проблеми моделювання, 2019. Вип. 15. С. 151–161.
6. Методологічні підходи до оцінки рівня економічної безпеки країни / Під ред. Ю.М. Харазішвілі. Наука та наукознавство. 2014. № 4. С. 44–58.
7. Манак А.Ф. Системне дослідження безперервного електронного навчання як складної інформаційної системи. Control Systems and Computers. 2022. № 3. С. 53–62. <https://doi.org/10.15407/csc.2022.03.053>
8. Мороз О.Г. Побудова авторегресійних моделей на основі комбінаторно-генетичного алгоритму. Індуктивне моделювання складних систем: Зб. наук. пр. Київ: МННЦ ІТС НАН та МОН України, 2019. Вип. 11. С. 53–60.

#### Матеріали конференцій

9. Суровцев І.В., Степашко В.С., Галімова В.М., Савченко-Синякова Є.А., Єфіменко С.М., Мороз О.Г. Математичне моделювання нижньої огинаючої диференціального сигналу для задачі інверсної хронопотенціометрії. Міжнародна науково-практична конференція «Математичне та імітаційне моделювання систем» МОДС 2024, Чернігів, Україна, НУ «Чернігівська політехніка», 11-13 листопада 2024 р.
10. Chavarriga, O., Florian-Gaviria, B., Solarte, O. A Recommender System for Students Based on Social Knowledge and Assessment Data of Competences. In: Rensing, C., de Freitas, S., Ley, T., Muñoz-Merino, P.J. (eds) Open Learning and Teaching in Educational Communities. EC-TEL 2014. Lecture Notes in Computer Science, 2014. Vol. 8719. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-11200-8\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-11200-8_5)

#### Електронні ресурси

11. Закон України від 21.06.2018 № 2469-VIII Про національну безпеку України. URL: <https://ips.ligazakon.net/document/T182469> (дата звернення: 15.09.2023).
12. OpenAerialMap. URL: <https://openaerialmap.org/>
13. 24 Канал. Якою мовою українці спілкуються вдома: опитування. URL: [24tv.ua/yakoyu-movoyu-ukrayintsi-spilkuuyutsya-vdoma-opituvannya-ukrayina-novini\\_n1715078](http://24tv.ua/yakoyu-movoyu-ukrayintsi-spilkuuyutsya-vdoma-opituvannya-ukrayina-novini_n1715078) (дата звернення 10.07.2024)
14. Наукові публікації і видавнича діяльність НАН України. Київ, 2007. URL: <http://www.nas.gov.ua/publications> (дата звернення: 19.03.2014)

#### Патенти

15. Пат. КМ 98077 Україна. Спосіб одержання йодиду цезію або йодиду натрію для вирощування монокристалів. Опубл. 10.04.2015.

Journal “*Information Technologies and Systems*” that is a merger of two academic journals with a long history – Control Systems and Computers journal ISSN (Print) 2706-8145, ISSN (Online) 2706-8153 (published since 1972) and Cybernetics and Computer Engineering journal ISSN (Print) – 2663-2578, ISSN (Online) – 2663-2586 (published since 1965). The organization responsible for publishing the journal is Institute of Information Technologies and Systems of National Academy of Sciences of Ukraine.

The journal publishes original scientific and review papers about fundamental and applied research results of informatics and information technologies, intelligent control and systems, methods and means of information technology support of knowledge, application of the mentioned technologies in various fields of life. Number of Issues is 6 per year. Currently, the journal does not charge any fees to the authors from submission to publication. The papers are an Open Access under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

Журнал «Інформаційні технології та системи» є результатом об'єднання двох академічних журналів з багаторічною історією – журналу «Системи керування та обчислювальна техніка» ISSN (друковане видання) 2706-8145, ISSN (онлайн) 2706-8153 (видається з 1972 року) та журналу «Кібернетика та обчислювальна техніка» ISSN (друковане видання) – 2663-2578, ISSN (онлайн) – 2663-2586 (видається з 1965 року). Організацією, відповідальною за видання журналу, є Інститут інформаційних технологій та систем Національної академії наук України.

Журнал публікує оригінальні наукові та оглядові статті про фундаментальні та прикладні результати досліджень інформатики та інформаційних технологій, інтелектуального керування та систем, методів та засобів інформаційно-технологічної підтримки знань, застосування згаданих технологій у різних сферах життя. Кількість випусків – 6 на рік. Наразі журнал не стягує жодних гонорарів з авторів від моменту подання до публікації. Статті знаходяться у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0.





**ISSN 3083-6573 INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS 2025, №5. 1-86**