

Харківський національний
університет радіоелектроніки

Kharkiv National
University of Radio Electronics

Державне підприємство
"Південний державний
проектно-конструкторський
та науково-дослідний інститут
авіаційної промисловості"

State Enterprise
"Southern National Design
&
Research Institute
of Aerospace Industries"

**СУЧАСНИЙ СТАН
НАУКОВИХ
ДОСЛІДЖЕНЬ
ТА ТЕХНОЛОГІЙ
В ПРОМИСЛОВОСТІ**

**INNOVATIVE
TECHNOLOGIES
AND
SCIENTIFIC SOLUTIONS
FOR INDUSTRIES**

№ 2 (24), 2023

No. 2 (24), 2023

*Щоквартальний
науковий
журнал*

*Quarterly
scientific
journal*

Харків
2023

Kharkiv
2023

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор
Бодяньскій Євгеній Володимирович,
д-р техн. наук, професор

Заступник головного редактора
Айзенберг Ігор Наумович,
канд. техн. наук, професор (США);
Шекер Серхат,
д-р техн. наук, професор (Туреччина)

Члени редколегії:

Артиух Роман Володимирович, канд. техн. наук, професор;
Бабенко Віталіна Олексіївна, д-р екон. наук, канд. техн. наук, професор;
Безкоровайний Володимир Валентинович, д-р техн. наук, професор;
Гасімов Юсіф, д-р мат. наук, професор (Азербайджан);
Гопсінко Віктор, д-р техн. наук, професор (Латвія);
Го Цян, д-р техн. наук, професор (КНР);
Джавад Хамісабаді, канд. техн. наук, доцент (Іран);
Зайцева Єлена, д-р техн. наук, професор (Словаччина);
Зачко Олег Богданович, д-р техн. наук, доцент;
Коваленко Андрій Анатолійович, д-р техн. наук, професор;
Костін Юрій Дмитрович, д-р екон. наук, професор;
Левашенко Віталій, д-р техн. наук, професор (Словаччина);
Лемешко Олександр Віталійович, д-р техн. наук, професор;
Малєєва Ольга Володимирівна, д-р техн. наук, професор;
Момот Тетяна Валеріївна, д-р екон. наук, професор;
Музыка Катерина Миколаївна, д-р техн. наук, професор;
Назарова Галина Валентинівна, д-р екон. наук, професор;
Невлюдов Ігор Шакирович, д-р техн. наук, професор;
Опанасюк Анатолій Сергійович, д-р фіз.-мат. наук, професор;
Павлов Сергій Володимирович, д-р техн. наук, професор;
Перова Ірина Геннадіївна, д-р техн. наук, доцент;
Петленков Едуард, канд. техн. наук (Естонія);
Петришин Любомир, д-р техн. наук, професор (Польща);
Рубан Ігор Вікторович, д-р техн. наук, професор;
Семенєв Валерій Васильович, д-р техн. наук, професор;
Семенов Сергій, д-р техн. наук, професор (Польща);
Сетлак Галина, д-р техн. наук, професор (Польща);
Терзіян Ваган Якович, д-р техн. наук, професор (Фінляндія);
Телетов Олександр Сергійович, д-р екон. наук, професор;
Тімофєєв Володимир Олександрович, д-р техн. наук, професор;
Філатов Валентин Олександрович, д-р техн. наук, професор;
Чумаченко Ігор Володимирович, д-р техн. наук, професор;
Чухрай Наталія Іванівна, д-р екон. наук, професор;
Юн Джин, канд. фіз.-мат. наук, професор (КНР);
Ястремська Олена Миколаївна, д-р екон. наук, професор.

ЗАСНОВНИКИ

Харківський національний університет радіоелектроніки,
Державне підприємство "Південний державний
проектно-конструкторський та науково-дослідний
інститут авіаційної промисловості"

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:

Україна, 61166, м. Харків, проспект Науки, 14
Інформаційний сайт: <http://itssi-journal.com>
E-mail редколегії: journal.itssi@gmail.com

EDITORIAL BOARD

Editor in Chief
Bodyanskiy Yevgeniy,
Dr. Sc. (Engineering), Professor, Ukraine

Deputy Chief Editor
Igor Aizenberg,
PhD (Computer Science), Professor (United States)
Serhat Seker,
Dr. Sc. (Engineering), Professor (Turkey)

Editorial Board Members:

Artiukh Roman, PhD (Engineering Sciences) (Ukraine);
Babenko Vitalina, Dr. Sc. (Economics); PhD (Engineering Sciences), Professor (Ukraine);
Bezkorovainyi Volodymyr, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Gasimov Yusif, Dr. Sc. (Mathematical), Professor (Azerbaijan);
Gopeyenko Victors, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Latvia);
Guo Qiang, Dr. Sc. (Engineering), Professor (P.R. of China);
Javad Khamisabadi, PhD (Industrial Management), Associate Professor (Iran);
Zaitseva Elena, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Slovak Republic);
Zachko Oleh, Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor (Ukraine);
Kovalenko Andrey, Dr. Sc. (Engineering), Professor, (Ukraine);
Kostin Yuri, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);
Levashenko Vitaly, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Slovakia);
Lemeshko Oleksandr, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Malyeyeva Olga, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Momot Tetiana, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);
Muzyka Kateryna, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Nazarova Galina, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);
Nevliudov Igor, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Opanasyuk Anatoliy, Dr. Sc. (Physical and Mathematical), Professor (Ukraine);
Pavlov Sergii, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Perova Iryna, Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor (Ukraine);
Petlenkov Eduard, PhD (Engineering Sciences) (Poland);
Petryshyn Lubomyr, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Poland);
Ruban Igor, Dr. Sc. (Engineering), Professor, (Ukraine);
Semenets Valery, Dr. Sc. (Engineering), Professor, (Ukraine);
Semenov Serhii, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Poland);
Setlak Galina, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Poland);
Terziyan Vagan, Dr. Sc. (Engineering), Professor, (Finland);
Teletov Aleksandr, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);
Timofeyev Volodymyr, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Filatov Valentin, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Chumachenko Igor, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Chukhray Nataliya, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);
Yu Zheng, PhD (Physico-Mathematical Sciences), Professor (P.R. of China);
Iastremaska Olena, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine).

ESTABLISHERS

Kharkiv National University of Radio Electronics,
State Enterprise "National Design & Research Institute
of Aerospace Industries"

EDITORIAL OFFICE ADDRESS:

Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauka Ave, 14
Information site: <http://itssi-journal.com>
E-mail of the editorial board: journal.itssi@gmail.com

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук наказом Міністерства освіти і науки України від 16.07.2018 №775 (додаток 7).

Свідоцтво про державну реєстрацію журналу Серія KB № 22696-12596P від 04.05.2017 р.

ЗМІСТ

Інформаційні технології

- 5 **Балаш Л. Я., Содома Р. І., Ковальчук О. І.**
Інтелектуальні системи формування проектних команд у безпекоорієнтованих системах (ua)
- 16 **Безкоровайний В. В., Колесник Л. В., Dr. Chinwi Mgbere**
Математичні моделі визначення Парето-фронтів для варіантів побудови технологічних процесів в умовах інтервального подання локальних критеріїв (eng)
- 27 **Гайко С. І.**
Онтолого-керовані засоби оброблення та подання великих масивів неструктурованих текстів (ua)
- 39 **Гобов Д. А., Зуєва О. В.**
Виявлення залежностей між контекстом ІТ-проекту та змістом документів бізнес-аналізу (eng)
- 54 **Гулієв Н. Б. огли, Перетяга М. Ю., Ховрат А. В., Тесленко Д. М., Назаров О. С.**
Дослідження моделей прогнозування та класифікації в задачах наявності діабету серед пацієнтів з інсультом у різних умовах життєдіяльності (eng)
- 62 **Каратаєв О. А., Шубін І. Ю.**
Проблеми повторного використання знань у процесі проектування програмних систем (ua)
- 72 **Клімішєн О. О., Красноруцький А. О., Кочук С. Б.**
Застосування технологій бездротового зв'язку й технічного зору для вдосконалення авіаційних операцій пошуку та рятування (ua)
- 80 **Корнієнко Є. Д., Ляшенко О. С., Торба О. О.**
Метод керування системою генерації електроенергії з використанням бездротових технологій (ua)
- 90 **Лега Є. С., Ляшенко С. О.**
Методи та алгоритми оцінювання цифрової інфраструктури закладів вищої освіти (ua)
- 104 **Лейба Я. А., Широкопетлева М. С., Груздо І. В.**
Дослідження методів визначення лояльності клієнтів та оцінювання рівня їхньої задоволеності (eng)
- 118 **Мазурова О. О., Андрущенко М. О., Широкопетлева М. С.**
Дослідження методів програмної реалізації *Costmos DB API* на платформі *.NET* (ua)
- 131 **Мерзлікін Є. В., Бабешко Є. В.**
Аналіз кібербезпеки веборієнтованих промислових *IoT*-систем (ua)
- 145 **Невлюдов І. Ш., Новоселов С. П., Сухачов К. І.**
Метод одночасної локалізації та картографування для побудови *2,5D*-карти навколишнього середовища засобами *ROS* (ua)
- 161 **Тесленко Д. М., Сорокіна А. С., Ховрат А. В., Гулієв Н. Б. огли, Курій В. В.**
Порівняння алгоритмів оверсемплінгу наборів даних та їх застосовності для проблеми категоризації (eng)
- 172 **Холєв В. О., Барковська О. Ю.**
Порівняльний аналіз нейромережних моделей для розв'язання завдань розпізнавання спікера (eng)

Сучасні технології управління підприємством

- 179 **Бондар А. В., Лапкін О. О.**
Методи й моделі формування портфелю проектів розвитку міського транспорту на базі концепції Смарт Порт-Сіті (ua)
- 191 **Бушуєв С. Д., Пілюгіна К. В., Еламс Четін**
Трансформація цінностей високотехнологічних проектів з моделі середовища *VUCA* до *BANI* (eng)
- 200 **Пітерська В. М., Самойловська В. П., Шахов В. І., Hiroshi Tanaka**
Ризико-орієнтоване управління портами в процесі реалізації проектів концесії (eng)
- 212 **Русанова С. С.**
Автоматизована система управління проектами в транспортній логістиці. Частина 2. Планування й управління проектом створення логістичного центру в *Project Management* (eng)
- 221 **Ховрат А. В., Тесленко Д. М., Гулієв Н. Б. огли, Курій В. В.**
Теоретико-експериментальне дослідження ірраціонального складника економічної поведінки українського суспільства на специфічних ринках (eng)
- 230 **Алфавітний покажчик**

CONTENTS

Information Technology

- 5 **Balash L., Sodoma R., Kovalchuk O.**
Intelligent systems for forming project teams in safety-oriented systems (ua)
- 16 **Beskorovainyi V., Kolesnyk L., Dr. Chinwi Mgbere**
Mathematical models for determining the Pareto front for building technological processes options under the conditions of interval presentation of local criteria (eng)
- 27 **Haiko S.**
Ontology-driven means for processing and presentation of large arrays of unstructured texts (ua)
- 39 **Gobov D., Zuieva O.**
Identifying the dependencies between IT project context and business analysis document content (eng)
- 54 **Huliiev N., Peretiaha M., Khovrat A., Teslenko D., Nazarov A.**
Study of prediction and classification models in the problems of diabetes among patients with a stroke in different conditions of living conditions (eng)
- 62 **Karataiev O., Shubin I.**
Reuse of information based on the interpretation of knowledge (ua)
- 72 **Klimishen O., Krasnorutskiy A., Kochuk S.**
Application of wireless communication and technical vision technologies to improve aviation search and rescue operations (ua)
- 80 **Korniienko Y., Liashenko O., Torba O.**
Management method of electricity generation system using wireless technologies (ua)
- 90 **Leha Y., Liashenko S.**
Methods and algorithms for assessing the digital infrastructure of higher education institutions (ua)
- 104 **Leiba Y., Shirokopetleva M., Gruzdo I.**
Research on methods of determining customer loyalty and assessing their level of satisfaction (eng)
- 118 **Mazurova O., Andrushchenko M., Shirokopetleva M.**
Research of methods of software implementation of the *Cosmos DB API* on the *.NET* platform (ua)
- 131 **Merzlikin E., Babeshko I.**
Cybersecurity analysis of web-oriented industrial IOT-systems (ua)
- 145 **Nevlyudov I., Novoselov S. Sukhachov K.**
Method of simultaneous localization and mapping for construction of 2.5D maps of the environment using ROS (ua)
- 161 **Teslenko D., Sorokina A., Khovrat A., Huliiev N., Kyriy V.**
Comparison of dataset oversampling algorithms and their applicability to the categorization problem (eng)
- 172 **Kholiev V., Barkovska O.**
Comparative analysis of neural network models for the problem of speaker recognition (eng)

Modern Enterprise Management Technologies

- 179 **Bondar A., Lapkin O.**
Methods and models for formation a portfolio of urban transport development projects based on the smart port city concept (ua)
- 191 **Bushuyev S., Piliuhina K., Elams Chetin**
Transformation of values of the high technology projects from a VUCA to a BANI environment model (eng)
- 200 **Piterska V., Samoilovska V., Shakhov V., Hiroshi Tanaka**
Risk-oriented management of ports in the implementation of concession projects (eng)
- 212 **Rusanova S.**
Automated project management system in transport logistics.
Part 2. Planning and managing a logistics center project in Project Management (eng)
- 155 **Khovrat A., Teslenko D., Huliiev N., Kyriy V.**
Theoretical and experimental study of the economic behavior irrational component of ukrainian society in specific markets (eng)
- 230 **Alphabetical index**

Л. Балаш, Р. Содома, О. Ковальчук

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ ФОРМУВАННЯ ПРОЄКТНИХ КОМАНД У БЕЗПЕКООРІЄНТОВАНИХ СИСТЕМАХ

Формування проєктних команд у галузі безпеки здійснюється в закладах вищої освіти, що готують кваліфікованих фахівців цивільного захисту. Одним із завдань є підвищення ефективності формування проєктних команд SOS службами HR, а також удосконалення процедури набору й відбору кадрів із використанням сучасних інформаційних технологій. Інформаційні системи забезпечують високу швидкість оброблення даних, пошук інформації, оптимізацію рекрутингу й аналіз кандидатів. Автоматизація HR-процесів допомагає зменшити трудомісткість і затрати ресурсів на виконання завдань. Нові моделі, методи й технології опрацювання матеріалів і відомостей про претендентів з метою їх оцінювання та подальшого залучення до проєкту SOS сприятиме сталому розвитку організації. **Предметом дослідження** є моделі автоматизації відбору кадрів у безпекоорієнтованих системах із подальшим формуванням проєктних команд служби цивільного захисту та правоохоронних органів. Одним із складників управління людськими ресурсами є реалізація підсистеми оцінювання та відбору трудових ресурсів, вихідні елементи якої є основою для прийняття кадрових рішень щодо формування проєктних команд. **Мета роботи:** сформалізувати критерії відбору кандидатів для зменшення суб'єктивізму оцінювання; виконати оптимізацію та автоматизацію процесу відбору, проєктування експертних систем підтримки прийняття рішень для HR. У статті визначено такі **завдання:** спроектувати інформаційну систему формування проєктних команд у безпекоорієнтованих системах з огляду на параметри особистісних якостей і професійних навичок кандидатів із використанням інформаційних експертних систем. Для підвищення кількісної оцінки та якісних показників претендентів доцільно формалізувати критерії та їх вагові коефіцієнти з допомогою теорії кваліметрії та методів оцінювання персоналу. У дослідженні застосовано **методи** системного аналізу, емпіричні методи та методологію управління проєктами. Здобуто такі **результати:** розроблено модель-схему ітераційного підходу до розроблення інформаційної системи управління людськими ресурсами для закладів вищої освіти з огляду на особливі умови навчання. **Висновки.** Проаналізовано методи оцінювання та відбору людських ресурсів, а також критерії їх обрання в складних соціотехнічних системах. Розглянуто можливості автоматизації HR-процесів та інтеграції інформаційної системи підтримки формування проєктних команд у безпекоорієнтованій системі. Описано життєвий цикл складних систем безпекоорієнтованої системи, зокрема соціально-технічних, з огляду на їх особливості та середовища.

Ключові слова: безпекоорієнтована система; індексний метод; управління людськими ресурсами; експертні системи.

Вступ

Одним із шляхів забезпечення успіху стратегії організації є створення проєктних команд. Ефективна реалізація місії та цілей у безпекоорієнтованих організаціях досягається завдяки злагодженій роботі підрозділів усіх рівнів безпекоорієнтованої системи. Якість процесів управління людськими ресурсами, а саме відбір, оцінювання та кадрове забезпечення, відіграють важливу роль у досягненні цілей захисту населення в турбулентному та динамічному середовищі. Процеси формування проєктної команди є ресурсомісткими через особливість кваліфікації фахівців. Основною проблемою топ-менеджменту під час підбору персоналу є оцінка відповідності кандидата його майбутній ролі в проєкті.

Провідними в системі управління є такі сучасні проєктні методології, як *Prince2*, *P2M*, *PmBOK*

та гнучкі підходи *Agile Scrum*, *Kanban*, *Lean*, *XP*. Одним із складників управління людськими ресурсами є реалізація підсистеми оцінювання та відбору трудових ресурсів, вихідні елементи якої є основою для прийняття кадрових рішень щодо формування проєктних команд.

У сучасному світі інформація та люди є найважливішими ресурсами. З розвитком суспільства та збільшенням знань обсяги інформаційного ресурсу зростають. Відповідно, інформаційні технології все активніше застосовуються в різних галузях. Сучасні технології мають широкий спектр використання, наприклад, автоматизація управління людськими ресурсами завдяки інформаційним системам (HRIS). З їх допомогою різні організації мають змогу ефективніше планувати проєкти, програми й портфелі проєктів, досягати стратегічних цілей та розкривати свій потенціал. Тому необхідно брати

їх до уваги для управління проєктами в галузі безпеки людини та SOS як важливого компонента критичної інфраструктури країни, метою якої є захист держави.

Безпекоорієнтована система (SOS) – це складна соціотехнічна структура, об'єднана низкою цільових компонентів: національною безпекою, цивільним захистом, внутрішнім порядком, захистом інтересів суспільства. Забезпечують інтереси держави команди кваліфікованих фахівців. Команда – основа ефективної діяльності організації загалом та її підструктур. Питання, пов'язані зі створенням команди, надзвичайно актуальні, адже це є найбільш прогресивною стратегією організації. З метою їх підготовки використовують бази для здобувачів вищої освіти із спеціальними умовами навчання, що передбачають проходження військової служби (цілодобові наряди, стажування в бойових підрозділах в умовах невизначеності) та безпосередньо освітній процес (лекції, семінари, самостійна робота, підготовка до іспитів і заліків). Усі перелічені компоненти зумовлюють високі стандарти щодо здобувачів – майбутніх офіцерів. Тому важливою підфункцією (елементом) управління людськими ресурсами в SOS є рекрутинг, онбординг та формування проєктних команд. Необхідно відібрати якісний особовий склад для освітніх команд у вищих військових навчальних закладах (ВВНЗ), що здійснюють підготовку майбутніх фахівців у галузі безпеки людини.

Проєктне середовище ВВНЗ функціонує в мінливих, турбулентних і динамічних обставинах, приймати рішення доводиться в умовах підвищеного ризику, багатокритеріальності, тому необхідно зважати на досвід провідних країн світу щодо застосування сучасних інформаційних технологій. Тенденцією розвитку організацій майбутнього є диджиталізація та оцифрування процесів управління людськими ресурсами. Інформаційне середовище (потіки) в SOS часто формується досить повільно через консерватизм у методах управління, складну організаційну структуру ієрархічної форми, а також через її структурні та функціональні ланки, в яких відбуваються процеси регулювання й управління, що реалізуються рухом і перетворенням інформації.

Відповідно, втілення інновацій, нових ідей та принципів *Kaizen* (постійного розвитку) ускладнюється. Наявні методології управління проєктами, такі як *PmBOK*, *P2M*, *Prince 2* тощо, мають важливе значення в практичній діяльності,

але вони не враховують особливостей і компонентів спеціальних умов навчання здобувачів вищої освіти у ВВНЗ в SOS та складність формалізації елементів системи. Для зменшення трудомісткості завдань і затрат ресурсів доцільно інтегрувати сучасні інформаційні технології, а саме інформаційну систему підтримки формування проєктних команд, у безпекоорієнтованій системі.

Аналіз літератури

Проблеми формування проєктних команд у складних соціотехнічних системах досліджувало чимало науковців, зокрема С. Бушуєв, І. Чумаченко [1], І. Кононенко [2], О. Зачко [20] та ін.

У монографії І. Чумаченко [1] вивчалися мультипроєкти та заявники, що були відібрані для залучення в команду. Розробляється спеціальне програмне забезпечення для здійснення нових методів і моделей формування проєктних команд.

У роботі [4] "Формування команди проєкту з розвитку інформаційно-комунікаційних технологій" більш змістовно розглядається важливий аспект вимог до компетенцій учасників проєкту. Це сприяє підвищенню якості виконання та задоволеності зацікавлених сторін, а питання життєвого циклу висвітлюється неповністю. Це зі свого боку потребує дослідження групи процесів життєвого циклу в перспективі.

Для розв'язання завдань планування та управління портфелем проєктів на підприємствах реалізуються проєкти впровадження низки автоматизованих систем, ядром яких є корпоративна інформаційна система управління.

Провідні компанії також використовують їх в управлінні персоналом, зокрема асесмент-центри позитивно зарекомендували себе у світі. Удосконалюються методи комплексного оцінювання персоналу, що впливає на успішність формування колективу. Кандидати відповідають ролям у проєктах.

Наприклад, частота використання центрів оцінювання в США і Великобританії приблизно така: у компаніях з кількістю співробітників понад 500 осіб – до 70 %, а з кількістю працівників менше ніж 50 осіб – до 25 %.

За результатами досліджень аналітичної компанії *Ambysoft*, для ІТ-проєктів гнучкі методології кращі за класичні моделі, але компанії продовжують використовувати традиційні методології, що дають змогу успішно впроваджувати проєкти лише в 50 %

випадків, тоді як гнучкі методології перевищують цей показник (понад 60 % успіху) [19]. Гамбурзький інститут управлінської діагностики розробив систему вимог до менеджера, що може бути застосована в практиці комплектування проектних груп.

Більш змістовно розглядає важливий аспект вимог до компетенцій учасників проекту І. Кононенко [3] в роботі "Формування команди проекту з розвитку інформаційно-комунікаційних технологій". Це сприяє підвищенню рівня продуктивності та задоволеності зацікавлених сторін, а життєвий цикл не береться до уваги повністю. Отже, потребує дослідження група процесів життєвого циклу в майбутньому.

Значних успіхів у питаннях життєвого циклу досяг В. Морозов у роботі "Функціонально-рольовий підхід до опису життєвого циклу проектів проектно-орієнтованих корпорацій". Автор зосереджується на розробленні проектних корпорацій і виокремлює вісім основних етапів життєвого циклу та їх взаємозв'язок із створенням ключових документів, визначає організаційну структуру, функції та ролі учасників проекту як основу для успішного досягнення цілей. Але, зважаючи на особливість проектів і програм девелопменту нерухомості, ми не можемо повноцінно використовувати цю методологію в системі, орієнтованій на безпеку.

Доцільно також розглянути роботу кандидата економічних наук Ю. Грисюка "Моделювання життєвого циклу проектної групи". Автор наголошує на важливості етапу визначення стейкхолдерів проекту, методів управління проектною командою. Ю. Грисюк описує всі етапи життєвого циклу команди проекту та наводить приклади успішного функціонування організації. Його робота потребує подальшого дослідження та проаналізована, щоб описати життєвий цикл системи, орієнтованої на безпеку (LC SOS).

В SOS складно застосовувати наукові праці у сфері формування проектних команд через особливості функціонування організаційно-технічної системи. Це зумовлює розроблення нових методів і моделей формування проектних команд.

Виклад основного матеріалу

Управління людськими ресурсами спрямоване на ефективне формування команд в організації та їх координацію. Нині існує безліч різних цифрових інструментів, що можуть полегшити життя відділу кадрів. Сучасним трендом у комерційних

і некомерційних органах є застосування інструментів підтримки прийняття рішень *Enterprise resource planning ERP* і системи управління людськими ресурсами (HRMS).

Це програмне забезпечення, що спеціально розроблено для автоматизації процесів формування команд, функцій і процесів організації. Прикладне рішення дає змогу автоматизувати діяльність на великих фірмах зі складною структурою. Продукт розробляється з урахуванням особливостей діяльності організації. Підбираючи ERP для HR, важливо обрати такий, що пропонує якомога більше можливостей.

Ось деякі найпоширеніші: управління базами даних співробітників (зберігання, оброблення, поширення та управління персональною інформацією членів команди), підбір персоналу (обрання претендентів у проектні команди). Нижче подано порівняльну таблицю функціоналу систем ERP і HRM (табл. 1).

Таблиця 1. Порівняльна таблиця функціоналу систем ERP і HRM

Особливості	Особливості модулів ERP	Особливості HRMS
Рекрутинг	+	+
Основне управління базами даних співробітників	+	+
Оцінка ефективності	–	+
Робочі процеси	–	+
Портал для співробітників	–	+
Звіти та аналіз	+	+
Навчання та розвиток працівників	+	–

Основними процесами відбору кандидатів у ЗВО зі спеціальними умовами навчання, що готують фахівців у галузі безпеки людини, є: подання заяв, збирання первинної інформації, її верифікація, опрацювання з подальшим медичним, психологічним і фізичним тестуванням методами та моделями експертного оцінювання. Рутинні завдання щодо опрацювання інформації поглинають часові ресурси та є трудозатратними для кадрових служб.

HR-відділ SOS виконує чимало завдань щодо формування команди проекту, а саме:

- визначення цілей формування команди;
- прийняття рішення про лідерство в команді;
- відбір членів команди;
- налагодження комунікативних зв'язків між членами команди;

– розподіл функціональних обов'язків між членами команди;

– розвиток командної взаємодії.

Час у безпекоорієнтованій системі є критичним параметром, тому автоматизація ручних процесів завдяки інформаційним технологіям вивільняє потенціал організації.

Перевагою інформаційних систем є забезпечення високого темпу оброблення даних, швидкий пошук інформації, доступ до її джерел незалежно від місця розташування, зниження трудомісткості використання інформаційного ресурсу. Усі відомості про претендентів зберігаються в базі даних. Запити здійснює система управління базами даних – СУБД. Архітектуру HRIS доцільно використовувати як "клієнт-сервер". Концептуальну модель-схему життєвого циклу розроблення інформаційної системи подано на рис. 1.



Рис. 1. Концептуальна модель-схема життєвого циклу розроблення інформаційної системи

Вона складається із системи баз даних разом із системою управління базами даних (СУБД), базою знань експертів предметної галузі, прикладного програмного забезпечення, організаційно-методичного (нормативного) забезпечення та технічних засобів. Ця експертна система поєднує ручне управління, оцінювання проєктів експертами й оброблення інформації засобами штучного інтелекту. Агреговані

дані та звіти надаються експертам для підтримки прийняття рішення про залучення кандидата в проєктну команду.

Під час розроблення інноваційних продуктів застосовують гнучкі методології *Agile* та ітераційний підхід (*I*), що допомагає ефективно реалізовувати проєкти, зважаючи на всіх запити від стейкхолдерів. Вони мінімізують ризики завдяки коротким циклам розроблення продукту. Важливо брати до уваги всі етапи життєвого циклу проєкту: ініціацію (*i*), планування (*p*), реалізацію (*r*), завершення (*z*). Концептуальна стадія проєкту HRIS передбачає такі завдання:

- визначення зацікавлених сторін;
- формування вимог до системи;
- моделювання процесів в організації для реалізації цілей;
- модель організації;
- проєктування інформаційної системи.

Упровадження та інтеграція інформаційної системи вимагає підготовки менеджерів HR з подальшим тестуванням і оцінюванням результатів роботи продукту проєкту.

Інформаційна система HRM потребує математичного, інформаційного, лінгвістичного, програмного, технічного, організаційного й нормативно-правового забезпечення, а також гарантування безпеки даних.

Інформаційна система підтримки прийняття рішень у сфері рекрутингу здобувачів вищої освіти з особливими умовами навчання допоможе автоматизувати збирання первинних відомостей про кандидатів. Система вимог спрямована на забезпечення інформаційних потреб стейкхолдерів вступної кампанії та стратегічної мети SOS.

HRIS SOS містить такі підсистеми:

- інформаційного забезпечення;
- технічного (засоби оброблення інформації);
- математичного (методи та моделі);
- організаційно-методичного (нормативного) забезпечення;
- персонал (ІТ-відділ, фінансова та HR-служби) програмного забезпечення.

Завдяки архітектурі інформаційної системи "клієнт-сервер" накопичена інформація про вступників та результати тестування (медичного, психологічного, фізіологічного) додаватиметься в базу даних, що дасть змогу швидко її обробляти й надавати експертам. Ця система є взаємопов'язаною множиною

засобів, методів, моделей і персоналу для оброблення значних обсягів інформації для досягнення поставленої мети.

Важливо, щоб оцінка була об'єктивною, оскільки від цього залежить значення інтегрального показника й подальше формування рейтингу.

Для підвищення точності кількісної оцінки якісних показників претендентів доцільно формалізувати критерії та їх вагові коефіцієнти за допомогою теорії кваліметрії та методів оцінювання персоналу. Формалізація цих показників зменшить суб'єктивізм (результати подано в табл. 2).

Таблиця 2. Заходи щодо відбору кандидатів

Процедура відбору	Дії проєктного менеджера
вибір критеріїв для вакантної посади	обирає критерії претендентів
затвердження критеріїв	затверджує критерії
відбіркова співбесіда	проводить співбесіди з кандидатами
аналіз застосунків і анкети	аналізує заявників програми
тестування	експертне оцінювання
прийняття рішення про участь у діяльності колективу	приймає рішення про залучення кандидата в проєктну команду

На ефективність командування впливає впровадження компетентнісного підходу, а також аналіз профілю заявника та психограми. Аналітичні відомості дають змогу фахівцям розробляти інформаційні системи HRIS (рис. 2).

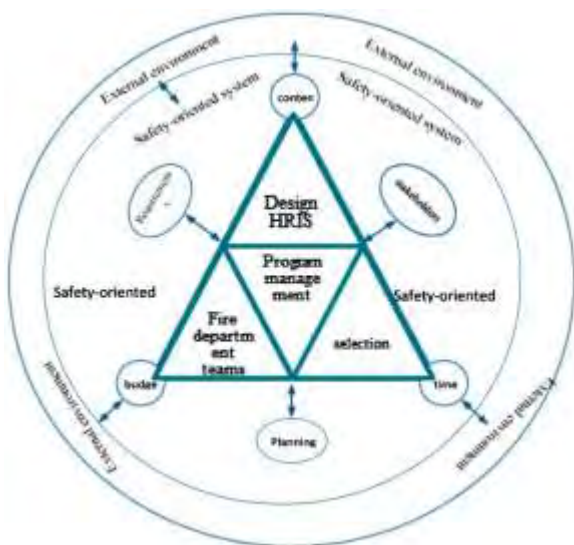


Рис. 2. Концептуальна модель дизайну проєкту HRIS

Критерії мають бути обрані для побудови "портрета ідеального кандидата". Наведемо критерії оцінювання здобувачів вищої освіти з особливими умовами навчання:

- [1] оперативність у прийнятті правильних рішень у позаштатних ситуаціях під час роботи;
- [2] уміння працювати в команді;
- [3] здатність діяти в нестандартних ситуаціях;
- [4] здатність брати відповідальність за професійну діяльність.

Для кращої формалізації розділимо ці ознаки на підкритерії (табл. 3).

Картка загальної оцінки параметрів членів команди подана нижче в табл. 4.

Етап формування визначається вирішальною роллю лідера колективу. Керівник проєкту зосереджується на допомозі членам команди, спілкуванні з ними, знайомстві для гармонізації процесів. Цей цикл містить значну невизначеність, у процесі якої вона зменшується мірою переходу до інших фаз проєкту. Інструментарій містить детальне визначення цілей, ролей, обов'язків і процедур, пов'язаних із діями команди.

Таблиця 3. Критерії та підкритерії для кандидатів у проєктні команди у сфері цивільного захисту

№	Критерій	Підкритерії
1	Оперативність у прийнятті правильних рішень у позаштатних ситуаціях під час роботи	рішучість
		надійність
		упевненість
2	Уміння працювати в команді	емпатія
		активне слухання
		комунікабельність
3	Уміння діяти в нестандартних ситуаціях	творчість
		відкритість
		цілеспрямованість
4	Здатність відповідально ставитися до професійної діяльності	відповідальність
		лояльність
		мотивація

Таблиця 4. Критеріальна модель оцінки

Підкритерій (<i>n</i>)	Відповідність рівень	Рівень відповідності (<i>ki</i>)	Ступінь впливу додаткових чинників <i>ki</i>	
			Наявність досвіду	Рівень освіти
Уміння працювати в команді	1	1,0	1	вища освіта
	2	0,8	1	вища освіта
	3	0,7	1	вища освіта
	4	0,6	1	вища освіта
	5	0,4	0	вища освіта
	6	0,1	0	вища освіта

На стадії "кипіння" виникають конфлікти в колективі. Група має подолати внутрішні суперечки для нового етапу розвитку команди. На цьому етапі високий ризик провалу проекту.

Необхідно регламентувати створення командних норм. Згуртованість членів команди та чітка взаємодія сприяють більшій продуктивності, ніж у "робочій групі".



Рис. 3. Життєвий цикл формування проектної команди в безпекоорієнтованій системі

Після виконання завдань команди часто розпадаються, а ця фаза також визначається особливими процесами. Щоб оптимізувати й автоматизувати процес відбору, варто розглянути експертні системи підтримки прийняття рішень для HR. Успішні глобальні компанії, зокрема *Oracle*, *IBM*, *SAP*, використовують HRIS, що дає змогу ефективно координувати роботу значної кількості персоналу та аналізувати ключові показники для організації. Такі інформаційні системи підтримки прийняття рішень сприяють досягненню цілей компанії.

Їх проектування та створення вимагає великих ресурсів. Відповідно, для розроблення такого продукту для організацій, орієнтованих на безпеку, необхідні "розумні" методи та моделі, що дають змогу надалі мінімізувати ризики на етапі реалізації проекту HRIS.

До основних методологій проектування інформаційних систем належать: SADT (структурне моделювання нотації IDEF0), RAD (метод швидкого прототипування та розроблення), RUP (для моделювання процесів створення IT-продукту). Для HRIS доцільно використовувати клієнт-серверну архітектуру, що містить такі компоненти: база даних, база знань, OLAP для оперативного оброблення даних.

З метою покращення процесу відбору необхідно перед співбесідою створити кадрову базу та анкету для кожного кандидата. База даних міститиме необхідну інформацію про учасників відбіркового конкурсу, а саме: світлина, стать, прізвище та ім'я, освіта, адреса та місце проживання, загальна інформація про адміністративну та кримінальну судимість, медичний і психічний стан, а також фізична здатність служити у військових формуваннях.

Експертна система передбачає шість логічно систематизованих етапів:

- 1) ідентифікація – визначення цілей, завдань, опис завдання, вихідні дані;
- 2) концептуалізація – аналіз і дослідження, що здійснюють фахівці предметної галузі;
- 3) формалізація – описування процесів роботи та вибір програмного забезпечення;
- 4) упровадження – здійснення проекту;
- 5) тестування – перевірка компетентності експертної системи;

б) експериментальна експлуатація придатності експертної системи.

Для нормального функціонування СППР (подано на рис. 4), інформатизації та кадрового обліку вимоги до баз даних мають бути враховані на етапі проектування. Реляційна база даних розроблена з використанням засобів CASE, UML, а саме діаграм EER в автоматизованих програмних середовищах. Наприклад, базу кадрів доцільно проектувати в середовищі *MySQL workbench*, що за своїм функціоналом дає змогу моделювати логічну структуру взаємовідносин.

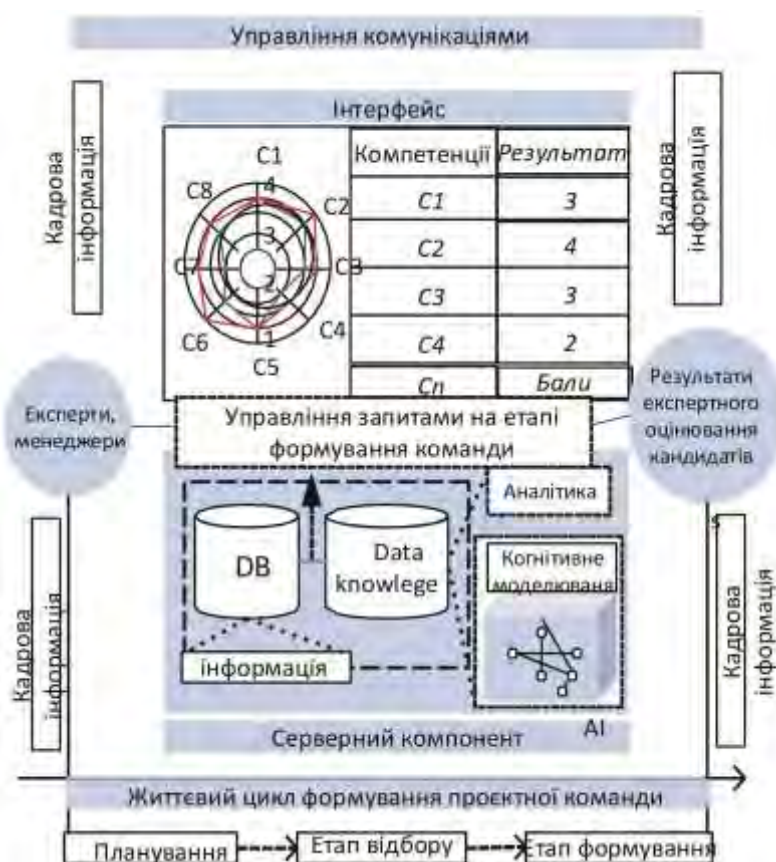


Рис. 4. Прототип інформаційної системи для оцінювання компетенцій членів команди проекту

Висновки

Отже, у статті розглянуто можливості автоматизації HR-процесів та інтеграції інформаційної системи підтримки формування проектних команд у безпекоорієнтованій системі. Запропоновано модель-схему ітераційного підходу до розроблення інформаційної системи управління людськими ресурсами для ЗВО з огляду на особливі умови навчання.

Проаналізовано методи оцінювання та відбору людських ресурсів, а також критерії їх обрання в складних соціотехнічних системах. У роботі подано проектний підхід до опису життєвого циклу складних систем безпекоорієнтованої системи, зокрема соціально-технічних, зважаючи на особливості та середовища. Розроблено модель формування інформаційної системи для її реалізації в безпекоорієнтованих системах автоматизації та оптимізації кадрових процесів управління персоналом.

Список літератури

1. Чумаченко І. В., Доценко Н. В., Косенко Н. В., Сабадош Л. Ю. Формування адаптивної команди проекту. *Управління проектами та розвиток виробництва*: зб. наук. праць. Луганськ: СХУ ім. В. Даля, 2011. № 2(38). С. 67–71. URL: <http://www.pmdp.org.ua/images/Journal/38/11civakp.pdf>
2. Rach V., Osakve I., Medvedeva O., Rossoshanska O., Borulko N. The method of project team configuration according to the criterion of subjective well-being. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. (98). P. 48–59. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160651>
3. Kononenko I., Sushko G. Formation of a project team for the developing of information and communication technologies. *ITLT*. Vol. 73. № 5. 2019. P. 307–322. DOI: <https://doi.org/10.33407/itlt.v73i5.2866>
4. Лисенко Д. Е., Чумаченко І. В., Виходець Ю. С., Пономаренко В. П. Прецедентний метод формування команди виконавців проекту. *Системи обробки інформації*. 2008. № 3(70). С. 168–175. URL: <https://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/6007>
5. Dumenko M., Prokopenko O. Evaluation of servicemen during the formation of the reserve list regarding staffing with trained personnel. *Collection of scientific works of the Center for Military and Strategic Studies of Ivan Chernyakhovsky National University*. 2019. P. 118–124. <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2019-1-65/118-124>
6. Rybydaylo A., Prokopenko O., Tureychuk A., Rudenska G. Key indicators of the effectiveness of personnel management of the armed forces. *Collection of scientific works of the Center for Military and Strategic Studies of the Ivan Chernyakhovsky National University*. 2019. P. 65–74. <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2019-1-65/65-74>
7. Novakivskyi I., Vysotskyi A. Formation of the project team taking into account the typological characteristics of managers. *Bulletin of the Lviv Polytechnic National University. Series: Problems of economics and management*. 2019. (3). P. 113–121. DOI: <https://doi.org/10.23939/semi2019.03.113>
8. Косенко Н. В., Доценко Н. В., Чумаченко І. В. Інформаційна технологія проектного управління формування команд з урахуванням компетентнісного підходу: монографія. *Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова*. 2019. 134 с. URL: <http://eprints.kname.edu.ua/53217/>
9. Tchaikovsky I., Tchaikovsky M., Chaikovska I., Chaikovskiy M. Development of an economic-mathematical model of project team formation in modern conditions: knowledge aspect. *Bulletin of the Khmelnytskyi National University*. 2021. № 3. URL: <http://elar.khmnu.edu.ua/jspui/handle/123456789/11880>
10. Івановська К. А. Оцінка ефективності методів при підтримці прийняття рішень у процесі формування проектних команд. *Матеріали XIV міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційні технології і автоматизація-2021"*. ХНУРЕ. 2021. С. 310–312. URL: <https://card-file.ontu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/c4b2c36a-bfa6-4ac6-83fa-207df330913a/content>
11. Yevtushenko H. Formation of the project team and organization of its effective work (theoretical aspect). *Eastern Europe: Economics, Business and Management*. 2019. № 4 (21). P. 77–82. URL: <http://www.easterneurope-ebm.in.ua/index.php/en/issue-21-2019>
12. Prochukhan D. V. Implementation of the application for surveying members of project teams. *Weapons systems and military equipment*. 2021. № 3 (67). P. 130–135. DOI:10.30748/soivt.2021.67.18
13. Данченко О. Б., Бедрій Д. І., Семко І. Б. Концептуальна модель формування високоефективної команди проекту. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами*. 2018. №1 (1277). С. 51–56. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/35047>
14. Prokopenko T., Obodovskyi B. Study of the impact of project team members' competencies on the effectiveness of the project in the field of information technologies. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Strategic management, portfolio, program and project management*. 2020. № 2. P. 50–55. DOI: doi.org/10.20998/2413-3000.2020.2.7
15. Dumenko M., Prokopenko O. Evaluation of servicemen during the formation of the reserve list regarding staffing with trained personnel. *Collection of scientific works of the Center for Military and Strategic Studies of Ivan Chernyakhovsky National University*. 2019. P. 118–124. DOI: <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2019-1-65/118-124>
16. Новикова О. О. Інформаційна технологія підтримки прийняття кадрових рішень для закладів вищої освіти України: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Національна академія Національної гвардії України. Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна МОН України. Харків, 2019. URL: http://dissertations.karazin.ua/tech/files/Novikova-01/aref_novikova.pdf

17. Blyznyukova I., Teslenko P., Malakhova D. Peculiarities of forming an IT project management team. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Strategic management, portfolio, program and project management*. 2022. № 2 (6). P. 14–20. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-3000.2022.6.3>

18. Blyznyukova I., Semko I., Kiyko S. Overview of modern IT project team management methodologies. *Management of the development of complex system*. 2020. № 43. P. 60–66. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.43.60-66>

19. Sencha I., Peclun K. A competent approach to the management of human resources of projects: The effectiveness of modern methods and tools. *Actual problems of public administration*. 2019. № 4 (80). P. 127–131. DOI: <https://doi.org/10.35432/1993-8330appa4802019194126>

20. Zachko O., Kobylkin D. Structural Models of Safety-Oriented Management of Infrastructure Projects Decomposition. *International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies*. 2020. № 2. P. 131–134. DOI: [10.1109/CSIT49958.2020.9321877](https://doi.org/10.1109/CSIT49958.2020.9321877)

21. Kobylkin D., Zachko O., Ratushny R., Ivanusa A., Wolff C. Models of content management of infrastructure projects mono-templates under the influence of project changes. *CEUR Workshop Proceedings*. 2021. № 2851. P. 106–115. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2851/paper10.pdf>

22. Kovalchuk O., Zachko O., Kobylkin D., Hiroshi T. IT development of HR-systems in the field of human safety. *CEUR Workshop Proceedings*. 2021. № 2851. P. 314–323. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2851/paper29.pdf>

References

1. Chumachenko, I., Dotsenko, N., Kosenko, N., Sabadosh, L. (2011), "Formation of an adaptive project team Formation of an adaptive project team", *Project management and production development*, No. 2 (38), P. 1–5. URL: <http://www.pmdp.org.ua/images/Journal/38/11civakp.pdf>

2. Rach, V., Osakve, I., Medvedeva, O., Rossoshanska, O., Borulko, N. (2019), "The method of project team configuration according to the criterion of subjective well-being", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, (98), P. 48–59. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160651>

3. Kononenko, I. Sushko, Г. (2019), "Formation of a project team for the developing of information and communication technologies", *ITLT*, vol. 73, No. 5, P. 307–322. DOI: <https://doi.org/10.33407/itlt.v73i5.2866>

4. Lysenko, D., Chumachenko, I., Vykhodets, Yu., Ponomarenko, V. (2008), "Precedent method of forming a team of project executors", *Information processing systems*, No. 3 (70), P. 168–175. URL: <https://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/6007>

5. Dumenko, M., Prokopenko, O. (2019), "Evaluation of servicemen during the formation of the reserve list regarding staffing with trained personnel", *Collection of scientific works of the Center for Military and Strategic Studies of Ivan Chernyakhovsky National University*, No. 1 (65), P. 118–124. DOI: <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2019-1-65/118-124>

6. Rybydaylo, A., Prokopenko, O., Tureychuk, A., Rudenska, G. (2019), "Key indicators of the effectiveness of personnel management of the armed forces", *Collection of scientific works of the Center for Military and Strategic Studies of the Ivan Chernyakhovsky National University*, No. 1 (65), P. 65–74. DOI: <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2019-1-65/65-74>

7. Novakivskiy, I., Vysotskyi, A. (2019), "Formation of the project team taking into account the typological characteristics of managers", *Bulletin of the Lviv Polytechnic National University. Series: Problems of economics and management*, (3), P. 113–121. DOI: <https://doi.org/10.23939/semi2019.03.113>

8. Kosenko, N., Dotsenko, N., Chumachenko, I. (2019), "Information technology of the project management of team building in the context of competency-based approach", *monograph, Beketov National University of Urban Economy, Kharkiv: O. M. Beketov NUUE*, P. 1–134 p. URL: <http://eprints.kname.edu.ua/53217/>

9. Tchaikovskiy, I., Tchaikovskiy, M., Chaikovska, I., Chaikovskiy, M. (2021), "Development of an economic-mathematical model of project team formation in modern conditions: knowledge aspect", *Bulletin of the Khmelnytskyi National University*, No. 3, P. 129–147. URL: <http://elar.khmnu.edu.ua/jspui/handle/123456789/11880>

10. Ivanovska, K. (2021), "Evaluation of the effectiveness of methods for supporting decision-making in the process of forming project teams", *Materials of the XIV International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Automation-2021"*, Kharkiv National University of Radio Electronics, P. 310–312. URL: <https://card-file.ontu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/c4b2c36a-bfa6-4ac6-83fa-207df330913a/content>

11. Yevtushenko, H. (2019), "Formation of the project team and organization of its effective work (theoretical aspect)", *Eastern Europe: Economics, Business and Management*, 4(21), P. 77–82. URL: <http://www.easterneurope-ebm.in.ua/index.php/en/issue-21-2019>
12. Prochukhan, D., (2021), "Implementation of the application for surveying members of project teams", *Weapons systems and military equipment*, 3 (67), P. 130–135. DOI:10.30748/soivt.2021.67.18
13. Danchenko, O., Bedrii, D., Semko, I. (2018), "Conceptual model of formation of a highly effective project team", *Bulletin of the KhPI National Technical University. Series: Strategic management, management of portfolios, programs and projects*, No. 1 (1277), P. 51–56. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/35047>
14. Prokopenko, T., Obodovskyi, B. (2020), "Study of the impact of project team members' competencies on the effectiveness of the project in the field of information technologies", *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Strategic management, portfolio, program and project management*, (2). P. 50–55. DOI: doi.org/10.20998/2413-3000.2020.2.7
15. Dumenko, M., Prokopenko, O. (2019), "Evaluation of servicemen during the formation of the reserve list regarding staffing with trained personnel", *Collection of scientific works of the Center for Military and Strategic Studies of Ivan Chernyakhovsky National University*, P. 118–124. DOI: <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2019-1-65/118-124>
16. Novikova, O. (2019), "Information technology for personnel decision-making support for higher education institutions of Ukraine", *Qualifying scientific work on manuscript rights. Dissertation for obtaining the scientific degree of candidate of technical sciences in the specialty 05.13.06 – information technologies. (Technical Sciences)*, National Academy of the National Guard of Ukraine, Kharkiv National University named after V.N. Karazina of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, P. 1–28. URL: http://dissertations.karazin.ua/tech/files/Novikova-01/aref_novikova.pdf
17. Blyznyukova, I., Teslenko, P., Malakhova, D. (2022), "Peculiarities of forming an IT project management team", *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Strategic management, portfolio, program and project management*, 2 (6). P. 14–20. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-3000.2022.6.3>
18. Blyznyukova, I., Semko, I., Kiyko, S. (2020), "Overview of modern IT project team management methodologies", *Management of the development of complex systems*, (43). P. 60–66. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.43.60-66>
19. Sencha, I., Peclun, K., (2019), "A competent approach to the management of human resources of projects: The effectiveness of modern methods and tools", *Actual problems of public administration*, No. 4(80), P. 127–131. DOI: <https://doi.org/10.35432/1993-8330appa4802019194126>
20. Zachko, O., Kobylkin, D. (2020), "Structural Models of Safety-Oriented Management of Infrastructure Projects Decomposition", *International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies*, No. 2, P. 131–134. DOI: [10.1109/CSIT49958.2020.9321877](https://doi.org/10.1109/CSIT49958.2020.9321877)
21. Kobylkin, D., Zachko, O., Ratushny, R., Ivanusa, A., Wolff, C. (2021), "Models of content management of infrastructure projects mono-templates under the influence of project changes", *CEUR Workshop Proceedings*, 2851, P. 106–115. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2851/paper10.pdf>
22. Kovalchuk, O., Zachko, O., Kobylkin, D., Hiroshi, T. (2021), "IT development of HR-systems in the field of human safety", *CEUR Workshop Proceedings*, 2851, P. 314–323. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2851/paper29.pdf>

Received 10.06.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Балаш Лілія Ярославівна – кандидат економічних наук, доцент, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри права та менеджменту у сфері цивільного захисту, Львів, Україна; e-mail: balaszlilia@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5950-5236>

Содома Руслана Іванівна – кандидат економічних наук, доцент, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри права та менеджменту у сфері цивільного захисту, Львів, Україна; e-mail: sodomaruslana@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5020-6440>

Ковальчук Олег Ігорович – Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, ад'юнкт кафедри права та менеджменту у сфері цивільного захисту, Львів, Україна; e-mail: Justdoitolejka@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6584-0746>

Balash Liliya – PhD, Associate Professor, Lviv State University of Life Safety, Associate Professor at the Department of Law and Management in the Field of Civil Protection, Lviv, Ukraine.

Sodoma Ruslana – PhD, Associate Professor, Lviv State University of Life Safety, Associate Professor at the Department of Law and Management in the Field of Civil Protection, Lviv, Ukraine.

Kovalchuk Oleh – Lviv State University of Life Safety, Adjunct at the Department of Law and Management in the Field of Civil Protection, Lviv, Ukraine.

INTELLIGENT SYSTEMS FOR FORMING PROJECT TEAMS IN SAFETY-ORIENTED SYSTEMS

Human security project teams are formed in higher education institutions that train qualified civil protection specialists. One of the tasks is to increase the efficiency of forming SOS project teams by HR services, as well as to improve the recruitment and selection procedure using modern information technologies. Developing human resources, improving the quality of higher education for its applicants. Information systems provide high speed data processing, information search, recruitment optimization and candidate analysis. Automation of HR processes helps to reduce the labor intensity and resource costs of tasks. New models, methods, and technologies for processing materials and information about applicants for the purpose of evaluating them for further involvement in the SOS project will contribute to the sustainable development of the organization. **The subject of the study** is models for automating the selection of personnel in safety-oriented systems with their subsequent formation into project teams of the civil protection service and law enforcement agencies. One of the components of human resource management is the implementation of a subsystem for the assessment and selection of human resources, the initial elements of which are the basis for making personnel decisions on the formation of project teams. **The purpose of the study** is to formalize the criteria for selecting candidates to reduce the subjectivity of the assessment; optimize and automate the selection process, design expert decision support systems for HR. The article sets the following **tasks**: to design an information system for the formation of project teams in safety-oriented systems, taking into account the parameters of personal human qualities and professional skills of candidates using information expert systems. To improve the quantitative assessment and qualitative indicators of applicants, it is advisable to formalize the criteria and their weighting coefficients using the theory of qualimetrics and personnel assessment methods. The following **research methods** were used: system analysis, empirical methods, and project management methodology. The following **results** have been obtained: a model-scheme of an iterative approach to the development of an information system for human resource management for higher education institutions, taking into account specific learning conditions, has been developed. **Conclusions.** The methods of evaluation and selection of human resources, as well as the criteria for their selection in complex socio-technical systems are analyzed. The possibilities of automating HR processes and integrating an information system to support the formation of project teams in a safety-oriented system are considered. description of the life cycle of complex systems of a safety-oriented system, namely, the life cycle of such complex socio-technical systems is described, taking into account their characteristics and environment.

Keywords: safety-oriented system; index method; human resources management; expert systems.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Балаш Л. Я., Содома Р. І., Ковальчук О. І. Інтелектуальні системи формування проєктних команд у безпекоорієнтованих системах. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 2 (24). С. 5–15. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.005>

Balash, L., Sodoma, R., Kovalchuk, O. (2023), "Intelligent systems for forming project teams in safety-oriented systems", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (24), P. 5–15. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.005>

V. BESKOROVAINYI, L. KOLESNYK, DR. CHINWI MGBERE

MATHEMATICAL MODELS FOR DETERMINING THE PARETO FRONT FOR BUILDING TECHNOLOGICAL PROCESSES OPTIONS UNDER THE CONDITIONS OF INTERVAL PRESENTATION OF LOCAL CRITERIA

The **subject** of research in the article is decision-making support processes in the tasks of optimizing technological processes (TP) at the stages of their design or reengineering. The **goal** of the work is to improve the efficiency of technologies of automated design of TP due to the development of mathematical models of the tasks of selecting subsets of effective design solutions with intervally specified characteristics of options. The following **tasks** have been solved in the article: review and analysis of the current state of the problem of supporting decision-making in the tasks of optimization of TP at the stages of their design or reengineering; decomposition of the problem of making project decisions; formalization of the task of comparing intervals for selection of Pareto fronts using comparison indices based on the generalized Hukuhari difference; development of a mathematical model of the problem for the method based on Carlin's lemma; development of a mathematical model of the problem for the method based on Hermeyer's theorem; determination of the Pareto front in the task of optimization of TP by the method of pairwise comparisons. The following **methods** were used: system approach, theories of systems, theories of usefulness, theories of decision-making, system design, optimization and operations research. **Results.** The place and connections of the problem of determining the Pareto front in the problem of making project decisions are determined. A formalized interval comparison procedure for the selection of Pareto fronts using Hukuhari total difference comparison indices. Mathematical models of the problem of selection of Pareto fronts using methods based on Carlin's lemma and Hermeyer's theorem have been developed for the case of interval publication with the value of local criteria. An example of the formation of the Pareto front in the problem of optimization of the technological process by the method of pairwise comparison according to the indicators of the duration of the technological cycle, reliability and specified costs is given. **Conclusions.** The proposed mathematical models expand the methodological bases of the automation of TP design processes. They make it possible to correctly reduce the set of alternative options for construction of TP for the final choice, taking into account the knowledge, experience of designers and factors that are difficult to formalize. The practical use of mathematical models will allow to increase the degree of automation of design or control processes, to reduce the time of decision-making in conditions of incomplete certainty of input data and to guarantee their quality by selecting them only from a subset of effective ones.

Keywords: technological processes; design automation; optimization; reengineering; multi-criteria evaluation; decision support; Pareto front.

Introduction

In the context of the transition to Industry 4.0, the quality and price of manufacturing companies' products are increasingly determined by the quality of the technological processes (TP) used to make them [1]. The effectiveness of manufacturing processes, in turn, is determined by decisions made at the stages of their design or reengineering. The process of TP design involves the iterative solution of a set of problems of their structural, parametric, topological optimization and the establishment of basic modes of operation [2–4]. The selection of the best options for the TP construction is carried out using a set of functional and cost indicators (local performance criteria). Mathematical models and methods of decision theory are used to optimize the options for the TP construction [5–7]. Due to the combinatorial nature of most TP optimization models, the number of alternative options for their construction

increases sharply with the growth of the problem dimension. The overwhelming majority of the options for constructing TPs generated in the process of their design are inefficient (dominated). There is a problem of forming a subset of efficient (non-dominated) design solutions that form a Pareto front or selecting such a subset from the formed set of valid options [8–9]. The evaluation of options for the construction of TPs according to local criteria is based on the results of modeling with a certain error [10]. As a result, decisions on the choice of the best option for the construction of the TP are made under conditions of incomplete certainty of its quality indicators. For TPs that involve dozens of operations, the generated or selected Pareto front may be quite powerful, unsuitable for final expert evaluation and selection. It is necessary to further reduce the set of effective options for building a TA, taking into account the given preferences between quality indicators.

The aforementioned, as well as the need to consider the errors in the estimates of the options determined using modeling, raises the problem of supporting design decisions on the TP, taking into account the interval representation of the values of local quality criteria. The use of interval mathematics methods to account for this kind of uncertainty requires the formalization of the interval comparison operation.

Analysis of the current state of the problem and methods of its solution

Today, the transition from traditional to additive manufacturing is relevant. Hybrid (integrated, combined) production, which combines the advantages of additive and traditional production technologies, is considered an intermediate stage. This requires a comprehensive optimization of the technological production chain and the necessary equipment. It is believed that the integration of product design, optimization of production technology, and operational management will allow companies to increase their competitiveness [11]. However, such integration significantly complicates the process of designing TP.

Digital modeling is used to determine the functional characteristics of the created TPs. It allows you to automatically evaluate the technological routes generated during the design process. It involves formalization based on modular technology, optimization, product realization modeling, and analysis of the results. Technological routes optimized in this way ensure a balanced and efficient organization of the production process [10]. However, the use of modeling allows only an approximate determination of TP characteristics, which in decision-making situations meets the challenges of incomplete data certainty.

As a result of the decomposition of the TP system optimization problem as a territorially or spatially distributed object at the lower level l a set of interrelated tasks is identified at the lower level $Tasks = \{Task_i^l\}$ [12]: $Task_1^l$ – determination of requirements for TP and their formalization; $Task_2^l$ – optimization of the structure of TP (a set of equipment and transitions between them); $Task_3^l$ – optimization of the topology of TP elements (equipment placement); $Task_4^l$ – optimization of operating modes; $Task_5^l$ – selection of types or parameters of equipment and transitions between them;

$Task_6^l$ – evaluation and selection of the best option for building TP.

The process of system TP optimization as a distributed object can be represented as a logical scheme for constructing an appropriate design solution [12].

$$LS = \langle Tasks, InDat, Res, DD, PD \rangle, \quad (1)$$

where $Tasks = \langle Task_i^l \rangle$, $i = \overline{1,6}$ – an ordered set of TP design tasks (models);

$InDat$ – set of input data of tasks;

Res – set of task constraints;

DD – a set of local design solutions (problem solutions);

PD – mappings presented in the form of design procedures (solution methods) that correspond to each pair $\langle InDat_i^l, Res_i^l \rangle$ a nonempty subset of local design solutions $\langle DD_i^l \rangle$, $i = \overline{1,6}$.

It is known that the ordered set of tasks in (1) is completely solvable if there are design procedures for each of them PD_i^l , $i = \overline{1,6}$ and each solution is unique [12]:

$$|PD_i^l(\langle InDat_i^l, Res_i^l \rangle)| = 1, \quad i = \overline{1,6}. \quad (2)$$

Modern technologies for designing TPs as complex objects are iterative. They involve the repeated implementation of procedures for generating and analyzing TP construction options and choosing the best among them. The essence of the decision-making in problems $Task_6^l$ is represented by the logical statement "It is necessary s^o " or formally in the form $\langle -, s^o \rangle$ (where s^o is the optimal design solution belonging to the set X of acceptable solutions) [13]. In this case, the decision-making situation Sit is usually incompletely defined due to the incomplete definition of goals and/or input data. To move to the decision-making problem $\langle Sit, s^o \rangle$, it is necessary to decompose the problem by solving auxiliary problems of the form "Given $\langle Sit, - \rangle$, Required $\langle Sit, s^o \rangle$ ", i.e. $\langle \langle Sit, - \rangle, \langle Sit, s^o \rangle \rangle$, or "Given $\langle -, s^o \rangle$, Required $\langle Sit, s^o \rangle$ ", i.e. $\langle \langle -, s^o \rangle, \langle Sit, s^o \rangle \rangle$.

Each of the tasks of the subset $Task_i^l$, $i = \overline{2,6}$ involves making decisions according to a set of local criteria $k_j(s)$, $j = \overline{1,m}$ (where m is the number of criteria). In this case, the local criteria are contradictory, have different physical content, dimensionality,

and measurement interval. In the most general case, the decision-making process is a set of tasks [14]: formalizing the goal of creating a TP; determining a universal set of options for building a TP S^U ; determining a subset of valid options $S \subseteq S^U$; selecting a Pareto front (a subset of effective options) $S^E \subseteq S$; ranking options $s^o \succ s_i \succ s_j \succ \dots \succ s_2$; selecting the best option $s^o \in S^E$.

TP design methods involve the generation and analysis of powerful sets of feasible options S . To reduce the time for solving problems, it is proposed to generate and analyze only effective options belonging to the Pareto front $S^E \subseteq S$. The power of a subset of efficient options $Card(S^E)$ can range from a few percent to a few thousandths of a percent of $Card(S)$. A variant of a design solution is called efficient $s^E \in S^E$ if there is no variant $s \in S$ for which the inequalities are satisfied on the set of admissible ones $j = \overline{1, m}$ [13]:

$$k_j(s) \geq k_j(s^E), \text{ if } k_j(s) \rightarrow \max, \quad (3)$$

$$k_j(s) \leq k_j(s^E), \text{ if } k_j(s) \rightarrow \min \quad (4)$$

and at least one of them was strict.

Depending on the specifics of decision-making tasks, different methods and algorithms for Pareto front selection are used: pairwise comparisons, based on Carlin's lemma and Hermeyer's theorem, evolutionary search based on genetic algorithms, sector, and segment [9, 13, 14].

The method of pairwise comparisons allows you to fully isolate the Pareto front $S^E = \{s\}$ on convex sets of options S . It involves a pairwise comparison of all possible pairs of options $s, v \in S$ and therefore has a relatively high time complexity [13].

Weighting methods, in particular those based on Carlin's lemma and Hermeyer theorem, allow for the identification of incomplete fronts. In addition, the method based on Carlin's lemma, like the sector and segment methods, is designed for convex sets of valid solutions [13]. When genetic algorithms are used for multicriteria optimization of options, their effectiveness is tested by solving two problems: the ability of the algorithm to converge to the Pareto front (convergence problem) and to distribute options evenly across the Pareto front (propagation problem) [9, 15]. One of the most widely used

genetic algorithms for solving the problem of forming a Pareto front on admissible sets of super-large sizes is the NSGA-II non-dominant sorting algorithm. Its features are: the ability to use binary data representation in conjunction with classical genetic operators (single-point crossing and point mutation); the ability to use decimal data representation for continuous optimization problems. The latter requires the use of specific genetic operators, such as simulated binary crossover and polynomial mutation.

To reduce the time complexity of the existing methods, procedures for preliminary selection of approximate Pareto fronts S' using sector or segment methods are used [13]. For such approximations, the requirement $S^E \subseteq S' \subseteq S$ must be fulfilled. These procedures provide for the preliminary determination of the options lying on the boundaries of the approximate set of options S' in the space of local criteria $k_j(s)$, $j = \overline{1, m}$ on the set of admissible options $S = \{s\}$. Hyperplanes are drawn through the points $\langle k_j^+, k_j^- \rangle$, $j = \overline{1, m}$ lying on the boundary of the set of admissible options $S = \{s\}$ in the space of local criteria $k_j(s)$, $j = \overline{1, m}$ which divide the options into subsets that fall into the sector $S'_1 \supseteq S^E$ or segment $S'_2 \supseteq S^E$, respectively, and are clearly ineffective $\overline{S^E}$:

$$S = S'_1 \cup \overline{S^E}, \quad S'_1 \cap \overline{S^E} = \emptyset; \quad (5)$$

$$S = S'_2 \cup \overline{S^E}, \quad S'_2 \cap \overline{S^E} = \emptyset. \quad (6)$$

In models of TP optimization problems, you can use the interval representation of characteristics $k_j(s) = [k_j^-(s); k_j^+(s)]$, $j = \overline{1, m}$ of the variants $s \in S$. In this case, each of the characteristics will be represented not by one value, but by two values that define its boundaries. For some interval values $a \in [a^-; a^+]$ and $b \in [b^-; b^+]$ of the local criteria $k_j(s)$, $j = \overline{1, m}$ the rules for performing classical arithmetic operations are determined by the relations [16–17]:

$$[c^-; c^+] = [a^-; a^+] \circ [b^-; b^+]; \quad (7)$$

$$[a] + [b] = [a^- + b^-; a^+ + b^+]; \quad (8)$$

$$[a] - [b] = [a^- - b^+; a^+ - b^-]; \quad (9)$$

$$[a] \cdot [b] = [\min\{a^- \cdot b^-, a^- \cdot b^+, a^+ \cdot b^-, a^+ \cdot b^+\}; \max\{a^- \cdot b^-, a^- \cdot b^+, a^+ \cdot b^-, a^+ \cdot b^+\}]; \quad (10)$$

$$[a]/[b] = [a] \cdot [1/b^+; 1/b^-]. \quad (11)$$

It is possible to compare the scores of design options represented by non-overlapping intervals by comparing their centers (mean values). For interval values of local criteria that intersect, the estimate of the generalized Hukuhari difference (interval difference, gH-difference) can be used [18–21].

An analysis of publications devoted to solving the problems of determining Pareto fronts in TP design decision-making technologies shows that

- existing mathematical models and methods are designed for conditions with point input data and have significantly different computational complexity and accuracy;

- features of modern decision support technologies show a tendency to increase the universalization of their mathematical support;

- it is possible to formulate requirements for effective technologies for solving the problems of forming and selecting subsets of non-dominated alternatives.

In view of this, the **aim of the article** is to increase the efficiency of TP computer-aided design technologies by developing mathematical models of the tasks selecting subsets of effective design solutions with interval-specific characteristics of options.

$$\hat{a} = [a^- + a^+] / 2, \quad \bar{a} = [a^+ - a^-] / 2, \quad \hat{b} = [b^- + b^+] / 2, \quad \bar{b} = [b^+ - b^-] / 2. \quad (12)$$

The generalized Hukuhari difference $A \overset{gH}{-} B$ and the comparison index $\gamma_{A,B}$ built on its basis for

$$A \overset{gH}{-} B = [\min\{a^- - b^-, a^+ - b^+\}; \max\{a^- - b^-, a^+ - b^+\}] = (\hat{a} - \hat{b}; |\bar{a} - \bar{b}|), \quad (13)$$

$$\gamma_{A,B} = (\bar{a} - \bar{b}) / (\hat{a} - \hat{b}). \quad (14)$$

In optimization problems with interval parameters or comparison index variables $\gamma_{A,B}$ (14) the measure of profit or risk is important when choosing an interval A instead of B only based on the fulfillment of the inequality $\hat{a} > \hat{b}$ [20–21].

In multifactorial evaluation of design decisions, local criteria may have different directions of desired change. In maximization problems with positive average return $\hat{a} > \hat{b}$, the following situations of interval intersection are possible [18].

Study results

Mathematical model of the interval comparison task

The implementation of Pareto front detection methods involves comparing options from the set of valid ones $S = \{s\}$ for each of the local criteria $k_j(s)$, presented in interval form $k_j(s) = [k_j^-(s); k_j^+(s)]$, $j = \overline{1, m}$. The comparison of the evaluations of design options according to local criteria, represented by non-overlapping intervals, will be carried out by comparing their average values (centers). If the intervals do intersect, the choice will depend on their relative position. To make a decision in such cases, some formal indicator (additional criterion) is needed. To compare the overlapping intervals, we will use the generalized Hukuhari difference estimate as such an indicator.

Here are the values of the j -th characteristic of the options $s_i, s_i \in S$ as intervals $A = [k_j^-(s_i); k_j^+(s_i)]$ and $B = [k_j^-(s_i); k_j^+(s_i)]$ in the form $A = [\hat{a}; \bar{a}]$ and $B = [\hat{b}; \bar{b}]$ where $\hat{a}, \hat{b}, \bar{a}, \bar{b}$ – respectively, are the centers and the radiuses of the intervals A and B :

intervals $A = [\hat{a}; \bar{a}]$ and $B = [\hat{b}; \bar{b}]$ are determined by the relation [18–19]:

Situation 1.1: $a^- < b^-$. In this situation, some values of the interval $a \in A$ are worse than all values of the interval $b \in B$, and the possible loss of decision quality in the worst case is $\bar{a} - \bar{b} < 0$. The ratio of the worst-case loss to the average gain is:

$$I_{1,1}(A, B) = (a^- - b^-) / (\hat{a} - \hat{b}) = 1 - \gamma_{A,B} < 0. \quad (15)$$

Situation 2.1: $a^- \geq b^-$. In this situation, some values of the interval $b \in B$ are worse than all values of the interval $a \in A$.

No losses in the worst-case scenario:

$$I_{2,1}(A, B) = (a^- - b^-) / (\hat{a} - \hat{b}) = 1 - \gamma_{A,B} > 0. \quad (16)$$

Situation 3.1: $a^+ < b^+$. In this situation, all values of the interval $a \in A$ are worse than some values of the interval $b \in B$. Negative value of the difference $a^+ - b^+ < 0$ reflects possible losses in the worst-case scenario. The ratio of losses to average profit in the worst case is determined by the ratio:

$$I_{3,1}(A, B) = (a^+ - b^+) / (\hat{a} - \hat{b}) = 1 + \gamma_{A,B} < 0. \quad (17)$$

Situation 4.1: $a^+ \geq b^+$. In this situation, some values of the interval $a \in A$ are better than all values of the interval $b \in B$, and there are no losses in the worst-case scenario:

$$I_{4,1}(A, B) = (a^+ - b^+) / (\hat{a} - \hat{b}) = 1 + \gamma_{A,B} > 0. \quad (18)$$

In minimization problems, the interval A is pre-selected compared to B , if $\hat{a} < \hat{b}$. Using the value of $\gamma_{A,B}$ (14), the risk measure for such a choice can be established. A significant difference $\hat{b} - \hat{a} > 0$ indicates a correct choice, but it is necessary to take into account the type of intersection of the intervals A and B [18].

Situation 1.2: $a^- < b^-$. In this situation, for each value of the interval $b \in B$ there are such values of $a \in A$, that $a < b$:

$$I_{1,2}(A, B) = (a^- - b^-) / (\hat{a} - \hat{b}) = 1 - \gamma_{A,B} > 0. \quad (19)$$

Situation 2.2: $a^- \geq b^-$. In this situation, some values of the interval $b \in B$ better (smaller) than all values of the interval $a \in A$. A positive difference

$$\lambda_j \in \Lambda = \left\{ \lambda_j : \lambda_j > 0 \quad \forall j = \overline{1, m}, \quad \sum_{j=1}^m \lambda_j = 1 \right\}, \quad (23)$$

$$s_i^o = \arg \max_{s \in S} \left\{ [P^-(s), P^+(s)] = \sum_{j=1}^m \lambda_j [\xi_j^-(s), \xi_j^+(s)] \right\}, \quad (24)$$

where λ_j , $j = \overline{1, m}$ – importance coefficients of local criteria; $P^-(x)$, $P^+(x)$ – lower and upper bounds of the global performance criterion for the option $s \in S$; $\xi_j^-(s)$, $\xi_j^+(s)$ – lower and upper bounds

$$\xi_j^-(s) = \left[\frac{k_i^-(s) - k_j^w}{k_j^b - k_j^w} \right]^{\alpha_j}, \quad \xi_j^+(s) = \left[\frac{k_i^+(s) - k_j^w}{k_j^b - k_j^w} \right]^{\alpha_j}, \quad j = \overline{1, m}, \quad (25)$$

$a^- - b^- > 0$ indicates possible losses in the worst case. The ratio of the worst-case loss to the average profit is given by the ratio:

$$I_{2,2}(A, B) = (a^- - b^-) / (\hat{a} - \hat{b}) = 1 - \gamma_{A,B} < 0. \quad (20)$$

Situation 3.2: $a^+ < b^+$. In this situation, some values of the interval $b \in B$ worse (larger) than all values of the interval $a \in A$:

$$I_{3,2}(A, B) = (a^+ - b^+) / (\hat{a} - \hat{b}) = 1 + \gamma_{A,B} > 0. \quad (21)$$

Situation 4.2: $a^+ \geq b^+$. In this situation, some values of the interval $a \in A$ are worse (larger) than all values of the interval $b \in B$. A positive difference $a^+ - b^+ > 0$ indicates possible losses in the worst case. The ratio of worst-case losses to average return is:

$$I_{4,2}(A, B) = (a^+ - b^+) / (\hat{a} - \hat{b}) = 1 + \gamma_{A,B} < 0. \quad (22)$$

Using comparison indices based on the estimation of the generalized Hukuhari difference (13)–(22), we obtain mathematical relations for determining Pareto fronts by the Carlin, Hermeyer, and pairwise comparison methods [13] for problems with interval values of local criteria.

Mathematical model of the problem for the method based on Carlin's lemma

A subset of feasible options S effective on a convex set S^E based on Carlin's lemma can be found by combining options s_j^o that optimize each of the local criteria $k_j(s)$, $j = \overline{1, m}$ by solving a parametric programming problem with respect to the parameters λ_j , $j = \overline{1, m}$:

of the value of the utility function of the i -th local criterion, $j = \overline{1, m}$.

To compute the bounds of the utility functions of local criteria, we use the classical relations with parameters α_j [17]:

where $k_j^-(s)$, $k_j^+(s)$ – lower and upper limits of the value of the j -th local criterion for the design solution $s \in S$; k_j^b , k_j^w – the best and worst values of the criterion on the set of valid options S .

To calculate the interval values of the total utility function $P^-(x)$, $P^+(x)$ in model (24), the

$$A + B = [a^- + b^-; a^+ + b^+] = (\hat{a} + \hat{b}; \bar{a} + \bar{b}); \quad (26)$$

$$\beta A = [\min\{\beta a^-, \beta a^+\}; \max\{\beta a^-, \beta a^+\}] = (\beta \hat{a}; \beta \bar{a}). \quad (27)$$

In a reasonable time, it is possible to accurately determine the front $S^E \subseteq S$ only for small sets of valid solutions $S = \{s\}$ [13].

operations of adding and multiplying intervals by the numbers λ_j , $j = \overline{1, m}$ are performed. Addition of intervals $A = [\hat{a}; \bar{a}]$ and $B = [\hat{b}; \bar{b}]$ and multiplication of an interval $A = [\hat{a}; \bar{a}]$ by a certain number $\beta \geq 0$ are performed according to the relations [18, 21]:

A mathematical model of the problem

for the method based on Hermeyer's theorem

A subset of effective options S^E on an arbitrary set of admissible options S using this method can be found by combining options s_j^o that optimize each of the local criteria $k_j(s)$, $j = \overline{1, m}$, by solving a parametric programming problem with respect to the parameters λ_j , $j = \overline{1, m}$:

$$\lambda_j \in \Lambda = \{\lambda_j : \lambda_j > 0 \quad \forall j = \overline{1, m}, \quad \sum_{j=1}^m \lambda_j = 1\}, \quad (28)$$

$$s_j^o = \arg \max_{s \in S} \{[P^-(s), P^+(s)] = \min_j \lambda_j [\xi_j^-(s), \xi_j^+(s)]\}. \quad (29)$$

This method allows Pareto fronts on both convex and non-convex sets of options $S = \{s\}$. Usually, it is impossible to determine the exact front using this method for sets of admissible options of large sizes due to the high complexity of the parametric programming problem (28)–(29) [13].

Experiment

Let us consider an example of solving the problem of forming a Pareto front in the TP optimization problem using the proposed models by the method of pairwise comparisons. The basic version of this method involves comparing different pairs of options from the set of admissible options [13]. The first option is selected from the set of valid options $s \in S$, which at this stage is the basis of the Pareto front S^E . Each of the following options $v \in S$ is compared with each of the front options $s \in S^E$ (at the first step is the only option). If the current option $v \in S$ is better than every variant of the previously defined front S^E at least by one of the indicators k_j , $j = \overline{1, m}$, it is added to S^E . If some variant of the front $s \in S^E$ is worse by all indicators k_j , $j = \overline{1, m}$, than the

current option $v \in S$, it is excluded from the front, and the option $v \in S$ is added to the set S^E . After reviewing all the alternative options for building a TP, a full front will be selected, containing all the effective options S^E . In this way, the set of permissible TP construction options will be divided into two non-intersecting subsets of effective ones S^E and inefficient \bar{S}^E options:

$$S = S^E \cup \bar{S}^E, \quad S^E \cap \bar{S}^E = \emptyset. \quad (30)$$

This method allows you to identify complete Pareto fronts on both convex and non-convex sets of admissible options S . Based on the fact that the vast majority of TP construction options generated in the process of their design are inefficient (dominated), it is proposed to use this method already in the process of generating acceptable options $s \in S$. This will significantly reduce computer time and memory consumption in TP computer-aided design technologies.

Statement of the problem. The characteristics of the set of options for acceptable design solutions $S = \{s_i\}$, $i = \overline{1, 8}$, are evaluated according to three local criteria: the length of the technological cycle $k_1(s) \rightarrow \min$, reliability $k_2(s) \rightarrow \max$ and the

above costs $k_3(s) \rightarrow \min$. The characteristics of the options are determined with an error $\varepsilon_j \approx 0,05$, $j = \overline{1,3}$: $k_1(s) \in [3,601; 5,359]$; $k_2(s) \in [0,910; 0,993]$; $k_3(s) \in [9,683; 13,927]$ (Table 1).

It is necessary to determine a subset of options that make up the Pareto front S^E on the set of options $S = \{s_i\}$ for acceptable design solutions.

According to the ratio (12) for local criteria $k_j(s)$, $j = \overline{1,3}$ we calculate the values of the centers $\hat{k}_j(s)$ and radiuses $\bar{k}_j(s)$ of the corresponding intervals (Table 1). Based on the fact that it is desirable to minimize the first and third local criteria and maximize

the second, it becomes necessary to check the relative position of the corresponding intervals in all the situations considered above (15)–(22). In order to reduce the number of checks depending on the direction of the desired change in the local criteria by the relations (25) for $\alpha_j = 1$ we calculate the corresponding values of their utility (value) functions $\xi_j^-(s_i)$, $\xi_j^+(s_i)$, as well as the values of their centers and radiuses $\hat{\xi}_j(s_i)$, $\bar{\xi}_j(s_i)$, $j = \overline{1,3}$ (Table 2). Based on the fact that $\xi_j(s) \rightarrow \max$, $j = \overline{1,m}$ this will allow us to check the type of intersection of intervals only for the case of maximization – situations 1.1–4.1, i.e. (15)–(18).

Table 1. Characteristics of acceptable design options for TP construction options

Option	$k_1^-(s)$	$k_1^+(s)$	$\hat{k}_1(s)$	$\bar{k}_1(s)$	$k_2^-(s)$	$k_2^+(s)$	$\hat{k}_2(s)$	$\bar{k}_2(s)$	$k_3^-(s)$	$k_3^+(s)$	$\hat{k}_3(s)$	$\bar{k}_3(s)$
s_1	4,923	5,359	5,141	0,218	0,913	0,961	0,937	0,024	9,683	10,247	9,965	0,282
s_2	3,601	3,890	3,746	0,145	0,922	0,970	0,946	0,024	13,179	13,927	13,553	0,374
s_3	4,562	4,958	4,760	0,198	0,932	0,981	0,956	0,025	9,812	10,383	10,098	0,286
s_4	4,412	4,902	4,657	0,245	0,936	0,985	0,960	0,025	11,149	11,790	11,470	0,321
s_5	4,405	4,894	4,650	0,245	0,935	0,984	0,959	0,025	12,666	13,387	13,027	0,361
s_6	4,382	4,758	4,570	0,188	0,943	0,993	0,968	0,025	10,112	10,698	10,405	0,293
s_7	4,476	4,973	4,725	0,249	0,923	0,972	0,948	0,024	12,522	13,235	12,879	0,357
s_8	3,935	4,261	4,098	0,163	0,910	0,958	0,934	0,024	12,140	12,833	12,487	0,347

Table 2. Values of utility functions of local criteria for TP construction options

Option	$\xi_1^-(s)$	$\xi_1^+(s)$	$\hat{\xi}_1(s)$	$\bar{\xi}_1(s)$	$\xi_2^-(s)$	$\xi_2^+(s)$	$\hat{\xi}_2(s)$	$\bar{\xi}_2(s)$	$\xi_3^-(s)$	$\xi_3^+(s)$	$\hat{\xi}_3(s)$	$\bar{\xi}_3(s)$
s_1	0,248	0,000	0,124	0,124	0,036	0,614	0,325	0,289	1,000	0,867	0,934	0,066
s_2	1,000	0,836	0,918	0,082	0,139	0,723	0,431	0,292	0,176	0,000	0,088	0,088
s_3	0,453	0,228	0,341	0,113	0,264	0,855	0,560	0,295	0,970	0,835	0,902	0,067
s_4	0,539	0,260	0,399	0,139	0,310	0,904	0,607	0,297	0,655	0,504	0,579	0,076
s_5	0,543	0,265	0,404	0,139	0,299	0,892	0,595	0,296	0,297	0,127	0,212	0,085
s_6	0,556	0,342	0,449	0,107	0,402	1,000	0,701	0,299	0,899	0,761	0,830	0,069
s_7	0,502	0,220	0,361	0,141	0,161	0,747	0,454	0,293	0,331	0,163	0,247	0,084
s_8	0,810	0,625	0,717	0,093	0,001	0,578	0,290	0,289	0,421	0,258	0,339	0,082

To determine the composition of the front, we will use the method of pairwise comparisons. Taking into account that $\xi_j(s) \rightarrow \max$, $j = \overline{1,3}$, we use formulas (13)–(18) to calculate the value of the generalized Hukuhari difference and comparison indices for the utility functions of the first (Table 3), second (Table 4), and third (Table 5) local criteria.

After analyzing the value of the logical function *True/False* ($T/F = 1 \vee 0$) for all possible pairs $\langle s_i, s_j \rangle$, we establish the ratio of strict preference $R_j(S)$ on the set of acceptable design options $S = \{s_i\}$, $i = \overline{1,8}$ for each of the local criteria $k_j(s)$, $j = \overline{1,3}$:

$$R_1(S) = \{ \langle s_1, s_2 \rangle, \langle s_1, s_3 \rangle, \langle s_1, s_4 \rangle, \langle s_1, s_6 \rangle, \langle s_1, s_8 \rangle, \langle s_5, s_6 \rangle, \langle s_5, s_8 \rangle, \langle s_7, s_8 \rangle \}, \quad (31)$$

$$R_2(S) = \{ \langle s_1, s_2 \rangle, \langle s_1, s_3 \rangle, \langle s_1, s_4 \rangle, \langle s_1, s_5 \rangle, \langle s_1, s_6 \rangle, \langle s_1, s_7 \rangle, \langle s_1, s_8 \rangle \}, \quad (32)$$

$$R_3(S) = \{ \langle s_1, s_2 \rangle, \langle s_1, s_3 \rangle, \langle s_1, s_4 \rangle, \langle s_1, s_5 \rangle, \langle s_1, s_7 \rangle, \langle s_2, s_3 \rangle, \langle s_5, s_7 \rangle, \langle s_6, s_7 \rangle, \langle s_6, s_8 \rangle \}. \quad (33)$$

Table 3. Values of indices for comparing pairs of options by local criterion $k_1(s)$

Pair	$\gamma(s_i, s_j)$	Situations	Indexes $I_{k,l}$		T / F	Pair	$\gamma(s_i, s_j)$	Situations	Indexes $I_{k,l}$		T / F
$s_1 \succ s_2$	-0,392	2.1, 4.1	1,392	0,608	1	$s_2 \succ s_3$	-0,053	1.1, 3.1	1,053	0,947	0
$s_1 \succ s_3$	-0,711	2.1, 4.1	1,711	0,289	1	$s_5 \succ s_6$	-0,052	2.1, 4.1	1,052	0,948	1
$s_1 \succ s_4$	-0,655	2.1, 4.1	1,655	0,345	1	$s_5 \succ s_7$	-0,055	1.1, 3.1	1,055	0,945	0
$s_1 \succ s_5$	-0,053	1.1, 3.1	1,053	0,947	0	$s_5 \succ s_8$	-0,053	2.1, 4.1	1,053	0,947	1
$s_1 \succ s_6$	-0,051	2.1, 4.1	1,051	0,949	1	$s_6 \succ s_7$	-0,053	1.1, 3.1	1,053	0,947	0
$s_1 \succ s_7$	-0,054	1.1, 3.1	1,054	0,946	0	$s_6 \succ s_8$	-0,050	1.1, 3.1	1,050	0,950	0
$s_1 \succ s_8$	-0,053	2.1, 4.1	1,053	0,947	1	$s_7 \succ s_8$	-0,054	2.1, 4.1	1,054	0,946	1

Table 4. Values of indexes for comparing pairs of options by local criterion $k_2(s)$

Pair	$\gamma(s_i, s_j)$	Situations	Indexes $I_{k,l}$		T / F	Pair	$\gamma(s_i, s_j)$	Situations	Indexes $I_{k,l}$		T / F
$s_1 \succ s_2$	0,024	2.1, 4.1	0,976	1,024	1	$s_2 \succ s_3$	0,026	1.1, 3.1	0,974	1,026	0
$s_1 \succ s_3$	0,021	2.1, 4.1	0,979	1,021	1	$s_5 \succ s_6$	0,026	1.1, 3.1	0,974	1,026	0
$s_1 \succ s_4$	0,020	2.1, 4.1	0,980	1,020	1	$s_5 \succ s_7$	0,026	1.1, 3.1	0,974	1,026	0
$s_1 \succ s_5$	0,024	2.1, 4.1	0,976	1,024	1	$s_5 \succ s_8$	0,026	1.1, 3.1	0,974	1,026	0
$s_1 \succ s_6$	0,024	2.1, 4.1	0,976	1,024	1	$s_6 \succ s_7$	0,026	1.1, 3.1	0,974	1,026	0
$s_1 \succ s_7$	0,024	2.1, 4.1	0,976	1,024	1	$s_6 \succ s_8$	0,026	1.1, 3.1	0,974	1,026	0
$s_1 \succ s_8$	0,022	2.1, 4.1	0,978	1,022	1	$s_7 \succ s_8$	0,026	1.1, 3.1	0,974	1,026	0

Table 5. Values of indexes for comparing pairs of options by local criterion $k_3(s)$

Pair	$\gamma(s_i, s_j)$	Situations	Indexes $I_{k,l}$		T / F	Pair	$\gamma(s_i, s_j)$	Situations	Indexes $I_{k,l}$		T / F
$s_1 \succ s_2$	0,078	2.1, 4.1	0,922	1,078	1	$s_2 \succ s_3$	-0,043	2.1, 4.1	1,043	0,957	1
$s_1 \succ s_3$	-0,026	2.1, 4.1	1,026	0,974	1	$s_5 \succ s_6$	-0,026	1.1, 3.1	1,026	0,974	0
$s_1 \succ s_4$	-0,026	2.1, 4.1	1,026	0,974	1	$s_5 \succ s_7$	-0,024	2.1, 4.1	1,024	0,976	1
$s_1 \succ s_5$	-0,026	2.1, 4.1	1,026	0,974	1	$s_5 \succ s_8$	-0,026	1.1, 3.1	1,026	0,974	0
$s_1 \succ s_6$	-0,030	1.1, 3.1	1,030	0,970	0	$s_6 \succ s_7$	-0,026	2.1, 4.1	1,026	0,974	1
$s_1 \succ s_7$	-0,025	2.1, 4.1	1,025	0,975	1	$s_6 \succ s_8$	-0,043	2.1, 4.1	1,043	0,957	1
$s_1 \succ s_8$	-0,024	2.1, 4.1	1,024	0,976	0	$s_7 \succ s_8$	-0,025	1.1, 3.1	1,025	0,975	0

From the intersection of the binary relations of strict preference (31)–(33), we establish the composition of a subset of inefficient options \bar{S}^E and the Pareto front S^E :

$$\bar{S}^E = \{s_2, s_3, s_4\}; S^E = \{s_1, s_5, s_6, s_7, s_8\}. \quad (34)$$

For the defined subset of inefficient options \bar{S}^E and the Pareto front S^E the initial conditions are met (30):

$$S^E \cup \bar{S}^E = S = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, s_7, s_8\}, \quad (35)$$

$$S^E \cap \bar{S}^E = \{s_1, s_5, s_6, s_7, s_8\} \cap \{s_2, s_3, s_4\} = \emptyset$$

It has been experimentally established that the accuracy and time of solving such problems by methods based on Carlin's lemma (23)–(24) and Hermeyer's theorem (28)–(29) significantly depend on the step $\Delta\lambda_j$ of changing the parameters λ_j , $j = \overline{1, m}$. Thus, during the solution of the problem with a uniform distribution of the characteristics of the options by the method of pairwise comparisons for $|S|=100\ 000$ and $m=3$ the

method based on Carlin's lemma identified 16.9%, and the method based on Hermeyer's theorem identified only 8.5% of solutions belonging to the Pareto front S^E .

Conclusion

Based on the results of the analysis of the current state of the problem of decision support in the process of TP optimization, the following has been established: the vast majority of problems are combinatorial and multicriteria; the number of alternative options for building TP increases sharply with the growth of their complexity; the vast majority of options are inefficient (dominated) and can be improved simultaneously by all local criteria; existing mathematical models, methods and algorithms are designed to solve problems with point input data; evaluation of options by In recent years, there have been publications on interval analysis, which propose a relatively simple and rational formalization of interval comparison operations in optimization problems. This has created the prerequisites for improving the efficiency of design decision support technologies by developing mathematical models of the tasks of selecting subsets of effective options, taking into account the interval representation of the values of local quality criteria.

It is proposed to compare the evaluations of design options according to local criteria, which are represented by non-overlapping intervals, by comparing their centers (average values). To compare overlapping intervals, it is proposed to use comparison indices based on the generalized Hukuhari difference as a formal indicator (additional criterion). Depending on the type of optimization criterion and the relative position of the intervals, such indices have the value of an indicator of the degree of gain or risk, when one of the intervals is selected only on the basis of comparison of their centers.

References

1. Rudalija, B. (2020), "Quality management research trends in context of Industry 4.0: A short review", *Defence and Security Studies*, Vol. 1, P. 44–52. DOI: <https://doi.org/10.37868/dss.v1.id149>
2. Martyn, Y., Liaskovska, S., Gregus, M., Izonin, I., Velyka, O. (2021), "Optimization of Technological's Processes Industry 4.0 Parameters for Details Manufacturing via Stamping: Rules of Queuing Systems", *Procedia Computer Science*, Vol. 191, P. 290–295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.07.036>
3. Malea, C., Nitu, L. (2020), "Optimization of the technological process and equipment of complex profiled parts", *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 916, 012058, P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/916/1/012058>
4. Nevliudov, I., Chala, O., Botsman, I. (2021), "Determination of technological process modes for surface formation of substrates for functional components of microoptoelectromechanical systems", *Functional Materials*, No. 28(2), P. 381–385. DOI: <https://doi.org/10.15407/fm28.02.381>

Using the comparison indices, we propose mathematical models of the problems of forming Pareto fronts based on pairwise analysis of options, Carlin's lemma, and Hermeyer's theorem. They are focused on combined technologies for ranking options using ordinal and cardinality approaches.

Given that the accuracy and time of solving such a problem by methods based on Carlin's lemma and Hermite's theorem significantly depend on the step of parameter change, it is advisable to use them only to determine approximations of large-sized fronts. Given that the vast majority of TP design options generated during their design are inefficient (dominated), it is proposed to use the method of pairwise comparisons already in the process of generating valid options. This will significantly reduce the cost of computer time and memory in automated TP design technologies.

The results obtained can be used in multifactorial decision-making technologies in design or control systems. The use of these technologies will increase the degree of automation of design or control processes, reduce decision-making time in conditions of incomplete certainty of input data, and guarantee the quality of these data by selecting them only from a subset of effective ones. The proposed mathematical models expand the methodological foundations for automating TP design processes. They make it possible to correctly reduce the set of alternative options for building TPs for the final selection, taking into account the knowledge, experience of designers and factors that are difficult to formalize.

Further research can be devoted to the development of more efficient methods of Pareto fronts extraction and multicriteria optimization for interval-specific characteristics of decision options.

5. Akram, M., Alcantud, J. C. R. (2023), "Multi-criteria Decision Making Methods with Bipolar Fuzzy Sets", 214 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-99-0569-0>
6. Huang, Z., Yue, H., He, Q. (2023), "Research on uncertain multiple attribute decision making based on improved possibility degree relation model and its application", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 123, Part B, P. 106349. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106349>
7. Wen, X. (2023), "Weighted hesitant fuzzy soft set and its application in group decision making", *Granular Computing 2023*, DOI: <https://doi.org/10.1007/s41066-023-00387-w>
8. Bejarano, L. A., Espitia, H. E., Montenegro, C. E. (2022), "Clustering Analysis for the Pareto Optimal Front in Multi-Objective Optimization", *Computation 2022*, Vol. 10(3), 37. DOI: <https://doi.org/10.3390/computation10030037>
9. Peri, D. (2020), "Direct Tracking of the Pareto Front of a Multi-Objective Optimization Problem", *Journal of Marine Science Engineering*, Vol. 8(9), 699. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse8090699>
10. Drobintsev, P., Voinov, N., Kotlyarova, L., Selin, I., Aleksandrova, O. (2020), "Optimization of Technological Processes at Production Sites Based on Digital Modeling", *Advanced Manufacturing and Automation IX. IWAMA 2019*, Vol. 634, P. 600–607. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-2341-0_75
11. Jacob, A., Steimer, S., Stricker, N., Häfner, B., Lanza, G. (2019), "Integrating product function design, production technology optimization and process equipment planning on the example of hybrid additive manufacturing", *Procedia CIRP*, Vol. 86, P. 222–227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.013>
12. Beskorovainyi, V., Imanhulova, Z. (2017), "Technology of large-scale objects system optimization", *ECONTECHMOD*, Vol. 06 (4), P. 3–8, available at: <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-5d27c6b0-9c2f-4023-9186-5a7036fe9d27>
13. Beskorovainyi, V., Petryshyn L., Shevchenko O. (2020), "Specific subset effective option in technology design decisions", *Applied Aspects of Information Technology*, Vol. 3., No. 1, P. 443–455. DOI: <https://doi.org/10.15276/aait.01.2020.6>
14. Beskorovainyi, V. (2020), "Combined method of ranking options in project decision support systems", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No 4 (14), P. 13–20. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.14.013>
15. Shadura, O. (2019), "Modification of genetic algorithms based on the method of non-centered principal components and standard tests" ["Modyfikatsiia henetychnykh alhorytmiv na osnovi metodu netsentrovanykh holovnykh komponent ta standartni testy"], *World Science*, No. 4(44), Vol. 1, P. 4–10. DOI: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30042019/6464
16. Jiang, C., Han, X., Xie, H. (2021), "The Basic Principles of Interval Analysis", *Nonlinear Interval Optimization for Uncertain Problems*, Springer Tracts in Mechanical Engineering, Springer, Singapore, P. 25–34. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-8546-3_2
17. Beskorovainyi, V., Kolesnyk, L. (2021), "Interval model of multi-criterion task of reengineering physical structures of distributed databases", *Intelligent information systems for decision support in project and program management: Collective monograph edited by I. Linde*, European University Press., Riga: ISMA, P. 7–14. DOI: <https://doi.org/10.30837/MMP.2021.007>
18. Guerra, M. L., Stefanini, L. (2012), "A comparison index for interval ordering based on generalized Hukuhara difference", *Soft Computing*, No 16 (11), P. 1–25. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00500-012-0866-9>
19. Stefanini, L., Guerra, M. L., Amicizia, B. (2019), "Interval Analysis and Calculus for Interval-Valued Functions of a Single Variable. Part I: Partial Orders, gH-Derivative, Monotonicity", *Axioms*, Vol. 8, No. 4, 113. DOI: <https://doi.org/10.3390/axioms8040113>
20. Stefanini, L., Arana-Jimenez, M. (2019), "Karush-Kuhn-Tucker conditions for interval and fuzzy optimization in several variables under total and directional generalized differentiability", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 362, P. 1–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fss.2018.04.009>
21. Kosheleva, O., Kreinovich, V., Pham, U. (2021), "Decision-making under interval uncertainty revisited", *Asian Journal of Economics and Banking*, Vol. 5(1), P. 79–85. DOI: <https://doi.org/10.1108/AJEB-07-2020-0030>

Received 16.06.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Безкоровайний Володимир Валентинович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри системотехніки, Харків, Україна; e-mail: vladimir.beskorovainyi@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7930-3984>

Колесник Людмила Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри системотехніки, Харків, Україна; e-mail: liudmyla.kolesnyk@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4417-7759>

Dr. Chinwi Mgbere – PhD, Professor, Project Manager, Office of Medicine, Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0270-6675>

Beskorovainyi Vladimir – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor at the Department of System Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Kolesnyk Lyudmyla – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor at the Department of System Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Dr. Chinwi Mgbere – PhD, Professor, Project Manager, Office of Medicine, Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0270-6675>

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРЕТО-ФРОНТУ ДЛЯ ВАРІАНТІВ ПОБУДОВИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В УМОВАХ ІНТЕРВАЛЬНОГО ПОДАННЯ ЛОКАЛЬНИХ КРИТЕРІЇВ

Предметом дослідження є процеси підтримки прийняття рішень у задачах оптимізації технологічних процесів (ТП) на етапах їх проектування чи реінжинірингу. **Мета роботи** – підвищення ефективності технологій автоматизованого проектування ТП з допомогою розроблення математичних моделей задач виділення підмножин ефективних проектних рішень з інтервально заданими характеристиками варіантів. У статті розв'язуються такі **завдання**: огляд і аналіз сучасного стану проблеми підтримки прийняття рішень у задачах оптимізації ТП на етапах їх проектування чи реінжинірингу; декомпозиція проблеми прийняття проектних рішень; формалізація задачі порівняння інтервалів для виділення Парето-фронтів із використанням індексів порівняння на основі узагальненої різниці Хукухари; розроблення математичної моделі задачі для методу на основі леми Карліна; створення математичної моделі задачі для методу на основі теореми Гермеєра; визначення фронту Парето в задачі оптимізації ТП методом парних порівнянь. Використовуються такі **методи**: системний підхід, теорії систем, теорії корисності, теорії прийняття рішень, системного проектування, оптимізації та дослідження операцій. **Результати**. Визначено місце та зв'язки задачі визначення Парето-фронту в проблемі прийняття проектних рішень. Формалізовано процедуру порівняння інтервалів для виділення Парето-фронтів із використанням індексів порівняння на основі узагальненої різниці Хукухари. Розроблено математичні моделі задачі виділення Парето-фронтів методами на основі леми Карліна й теореми Гермеєра для випадку інтервального подання значень локальних критеріїв. Наведено приклад формування Парето-фронту в задачі оптимізації технологічного процесу методом парних порівнянь за показниками тривалості технологічного циклу, надійності та наведених витрат. **Висновки**. Запропоновані математичні моделі розширюють методологічні основи автоматизації процесів проектування ТП. Вони уможливають коректне скорочення множини альтернативних варіантів побудови ТП для остаточного вибору з урахуванням знань, досвіду проектувальників і факторів, що важко піддаються формалізації. Практичне використання математичних моделей підвищить ступінь автоматизації процесів проектування чи керування, скоротить час прийняття рішень в умовах неповної визначеності вхідних даних і гарантуватиме якість цих даних завдяки їх вибору з підмножини ефективних.

Ключові слова: технологічні процеси; автоматизація проектування; оптимізація; реінжиніринг; багатокритеріальне оцінювання; підтримка прийняття рішень; Парето-фронт.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Безкоровайний В. В., Колесник Л. В., Dr. Chinwi Mgbere. Математичні моделі визначення Парето-фронту для варіантів побудови технологічних процесів в умовах інтервального подання локальних критеріїв. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 2 (24). С. 16–26. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.016>

Beskorovainyi, V., Kolesnyk, L., Dr. Chinwi Mgbere. (2023), "Mathematical models for determining the Pareto front for building technological processes options under the conditions of interval presentation of local criteria", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (24), P. 16–26. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.016>

С. ГАЙКО

ОНТОЛОГО-КЕРОВАНІ ЗАСОБИ ОБРОБЛЕННЯ ТА ПОДАННЯ ВЕЛИКИХ МАСИВІВ НЕСТРУКТУРОВАНИХ ТЕКСТІВ

Предметом дослідження статті є методи онтолого-керованого оброблення та подання неструктурованих текстів у глобальному середовищі. **Мета роботи** – підвищення ефективності автоматичного пошуку, класифікації та вибору необхідної інформації, що міститься в електронних виданнях у неструктурованій формі шляхом розроблення моделі, методу й засобів автоматизованого оброблення та трансдисциплінарного подання текстових документів, створених українською, російською та англійською мовами. Відповідно до мети визначено такі **завдання**: розглянути моделі оброблення та подання неструктурованих текстів; виявити переваги інформаційних систем з онтолого-керованою архітектурою; розробити концептуальну модель і засоби автоматизованого оброблення та трансдисциплінарного подання текстових документів; удосконалити метод рекурсивної редукції; за допомогою розроблених методів і засобів обробити великий масив неструктурованих текстів (зокрема інформаційну базу знань наукової продукції (ІБЗ НП), навчальні програми, а також навчально-дослідницькі проєкти НЦ "Мала академія наук України"); подати їх у вигляді, що дасть змогу виявляти якість і повноту наявної в базах системи знань і, отже, експериментально підтвердити ефективність розроблених засобів. Проведені дослідження ґрунтуються на таких **методах**: системологічної класифікації, алгебро-логічний та аксіоматичний методи, метод рекурсивної редукції. Здобуто такі **результати**: описано наявні моделі оброблення та подання неструктурованих текстів; удосконалено технологічні аспекти онтолого-керованого підходу до оброблення та подання великих масивів мережних документів; розроблено технологію формування онтологій документів на основі репрезентації їх таксономій, зв'язків між їх контекстами та множинного подання, що забезпечує ефективний пошук інформації в неструктурованих текстах. **Висновки**: обґрунтовано переваги онтолого-керованих засобів оброблення та подання неструктурованих текстів; подальшого розвитку набув метод рекурсивної редукції шляхом побудови перетворення, яке приводить до предикативної форми онтологічно задані описи інформації; викладено ідеї ефективного пошуку, оброблення, класифікації та вибору необхідної інформації.

Ключові слова: неструктуровані тексти; онтологія; рекурсивна редукція; таксономія; оброблення текстів; подання інформації.

Вступ

Найпоширенішою формою подання знань і досі залишаються неструктуровані тексти. Переважна більшість видань – від наукових статей до художніх творів – створюються людьми природною мовою та в такому неструктурованому вигляді зберігаються в надвеликій кількості в глобальному цифровому середовищі. Проте обробити та використати подібні інформаційні масиви людям без машинних засобів не під силу.

Для вирішення окресленої проблеми експертами розроблено цілі класи інформаційних систем, зокрема: повнотекстові бази даних та інтелектуальний пошук; системи автоматичного індексування й рубрикації; системи автоматичного анотування й реферування; інформаційно-пошукові системи; системи машинного перекладу; системи класу "Штучний інтелект" (Текст → База знань); системи генерації тексту (База знань → Текст) [1]. Перелічені системи призначені для вирішення вузькоспеціалізованих

завдань. Однак у сучасних умовах усе частіше виникає потреба у вирішенні комплексних завдань, пов'язаних із пошуком, обробленням, структуризацією та інтеграцією гетерогенної, розподіленої, неповної інформації.

Саме тому виникає необхідність у створенні та розвитку систем, що здатні обробляти великі масиви неструктурованих даних (зокрема природномовних документів) і цим надавати технологічну підтримку фахівцям різних галузей в ефективному та конструктивному застосуванні накопичених людством знань.

Аналіз проблеми й наявних методів

Аналізу методів оброблення та подання природномовних текстів (ПМТ) присвячені роботи таких дослідників: К. Jones [2], Е. Liddy [3], D. Jurafsky [4], О. Барковська [5], S. Praveena [6], С. Субботін [7] та ін. Пропонуємо стислий огляд найбільш поширених підходів до оброблення та подання ПМТ.

Обчислювальний підхід. Першими моделями, що розроблялися для завдань автоматичного перекладу, були: ієрархія граматик Хомського, граматика Вудса, граматика залежностей, імовірнісні автомати, моделі "Зміст – Текст" тощо. Вивчення подібних моделей сприяло створенню розвинутої теорії формальних мов.

Лінгвістичний підхід має чотири рівні. Перший полягає у виділенні окремих елементів тексту / документа, наприклад, розділів, абзаців, речень і под. Другий – у виявленні морфологічних характеристик окремого слова. Третій рівень відповідає за визначення синтаксичної залежності слів у реченнях. Останній рівень пов'язаний зі змістовим розумінням тексту, що передбачає розробки у сфері штучного інтелекту.

Статистичний підхід. В основі зазначеного підходу лежить припущення, що зміст тексту може бути визначено за найуживанішими словами. Основним завданням статистичного підходу є виявлення кількості повторень конкретного слова в тексті.

Імовірнісний підхід. Поданий такими моделями, як N -грами, системи, основані на деревах рішень, та ймовірнісні узагальнення контекстно-вільних граматик. N -грамна модель побудована на послідовності з n елементів: речень, слів, букв, звуків тощо. Модель дає змогу розрахувати ймовірність появи будь-якого елемента в тексті.

Символічний підхід. Цей підхід глибоко аналізує лінгвістичні явища та ґрунтується на явному поданні знань, що здійснюється шляхом використання добре досліджених схем подання знань і алгоритмів, які працюють із ними. Джерелом знання про мову можуть бути словники, формули й правила, розроблені людьми.

Коннективістський підхід. Зазначений метод оброблення природної мови відповідає за оброблення загальних моделей із використанням конкретних прикладів мовних явищ. Найбільш значуща відмінність коннективістського підходу від інших статистичних методів полягає в поєднанні статистичних знань і різних теорій уявлень, що дають змогу працювати з логічними висновками та трансформацією логічних формул.

Аналіз природномовних текстів неминуче пов'язаний із необхідністю подавати певним способом результати такого аналізу. До класичних методів подання знань належать: формальні логічні моделі, продукційні моделі, семантичні мережі, фрейми, нейронні мережі.

Формальні логічні моделі передбачають, що вся інформація, необхідна для вирішення прикладних завдань, розглядається як сукупність фактів і тверджень, що подаються як формули в деякій логіці. Знання відображаються сукупністю таких формул, а набуття нових знань зводиться до реалізації процедур логічного висновку.

Продукційні моделі (або моделі, основані на правилах) описують процедурні знання та дають змогу подати їх у вигляді пропозицій типу "якщо (умова) ..., то (дія)". Механізм, реалізований як засіб висновку в продукційних системах, називається машиною логічного висновку й виконує функції пошуку в базі правил, послідовно здійснює операції над знаннями та отримує висновки.

Семантичні мережі. Це графічні системи позначень для подання знань у шаблонах пов'язаних вузлів і дуг. Більш формально: це орієнтований граф, вершинами якого є поняття, а дугами – відношення між ними. За умови індуктивного виведення на основі фактів і відношень між ними, що існують у навколишньому світі, люди використовують асоціативні зв'язки.

Фрейми. Фреймова модель є систематизованою психологічною моделлю пам'яті людини та її свідомості. Фрейм – структура даних для подання деякого концептуального об'єкта. Це мінімальна структура інформації, необхідна для подання класу об'єктів, явищ або процесів.

Нейронні мережі – один із напрямів штучного інтелекту, мета якого змодельовати аналітичні механізми, що здійснюються людським мозком. Завдання, що вирішує типова нейромережа, – класифікація, передбачення та розпізнавання. Нейромережі здатні самостійно навчатися й розвиватися, будуючи свій досвід на помилках.

Домінування окремих методів умовно поділяють на такі періоди:

I етап (кінець 1940-х – кінець 1960-х рр.) – акцентування уваги на створенні систем машинного перекладу;

II етап (кінець 1960-х – кінець 1970-х рр.) – домінування теорій штучного інтелекту;

III етап (кінець 1970-х – кінець 1980-х рр.) – розроблення обчислювальних граматик і логічного програмування;

IV етап (1990-і роки) – застосування статистичного підходу;

V етап (2000-і рр. – сьогодні) домінування експліцитних методів семантичного аналізу текстової

інформації (алгоритми онтологічного семантичного аналізу) та методів латентно-семантичного аналізу.

Інформаційні системи з онтолого-керованою архітектурою (або знання-орієнтовані ІС) реалізують інтегровану інформаційну технологію, що передбачає комп'ютерне оброблення природномовних об'єктів, заданих лінгвістичним корпусом текстів, які описують деяку проблемну галузь, та вилучення предметно-орієнтованих знань з метою їх формально-логічного подання та автоматизованого оброблення. Зазначені системи набули особливої переваги для проведення складних міждисциплінарних наукових досліджень.

Попри широку популярність онтологічного інжинірингу серед фахівців з комп'ютерних наук, і, як наслідок, відчутну кількість фундаментальних і прикладних досліджень у цій галузі, вона залишається актуальною та перспективною [8, 9]. Особливо варто наголосити про дефіцит якісних методів і засобів онтолого-керованого оброблення природномовної інформації для україномовного сегменту.

Метою роботи є підвищення ефективності автоматичного пошуку, класифікації та вибору необхідної інформації, що міститься в електронних виданнях у неструктурованій формі, шляхом розроблення моделі, методу й засобів автоматизованого оброблення та трансдисциплінарного подання текстових документів, створених українською, російською та англійською мовами.

Вирішення завдання

Матеріали й методи

Технологічною базою для реалізації поставлених завдань застосовується web-орієнтований сервіс Когнітивна інформаційна технологія (КІТ) "Поліедр" [10], оскільки ця платформа дає змогу здійснювати такі інформаційні процеси:

- лінгвістично-семантичний аналіз мережних інформаційних ресурсів, що мають значну кількість міждисциплінарних відношень, та створення на основі використання різних інформаційних технологій і стандартів;

- трансдисциплінарну інтеграцію з іншими мережними інформаційними системами та web-орієнтованими застосунками;

- таксономізацію наративів довільних документів і відображення їх структури, зокрема міжконтекстних зв'язків;

- створення онтологічних інтерактивних документів;

- виявлення латентної інформації в інформаційних ресурсах, що аналізуються;

- глибинне й машинне навчання (*Deep Learning, Machine Learning*);

- підтримку форматів і протоколів *Semantic Web*;

- опрацювання великих даних (*Big Data*).

"Поліедр" має значну кількість застосунків і сервісів, об'єднаних у багатофункціональні модулі різного призначення. Базовими застосунками є такі: переглядач онтологій, редактор онтологій, пошукова призма, ранжування альтернатив, онтологічне автоматизоване робоче місце. Базовими сервісами є: індексатор (призначений для повнотекстового пошуку інформації у великих масивах структурованих і неструктурованих документів), агрегована таблиця (призначений для зберігання великих масивів структурованої інформації), конспект (призначений для структуризації неструктурованих документів шляхом виділення з них термінів), рекурсивний редуктор (призначений для структуризації слабкоструктурованої та неструктурованої інформації за допомогою спеціалізованих правил, заданих у форматі λ -виразів) тощо.

Усі модулі можуть додатково модифікуватися шляхом розроблення та підключення онтологічних шаблонів подання, унаслідок чого користувач із правами адміністрування може створювати нові, більш спеціалізовані застосунки, спрямовані на виконання конкретних завдань.

Для вирішення завдань, сформульованих у цій статті, створено спеціалізований застосунок "система трансдисциплінарного подання інформаційних ресурсів різних стилів", що ґрунтується на засадах трансдисциплінарності [11–13] та гіпотезі про ймовірність розвинення сервісу "рекурсивний редуктор" шляхом доповнення її класифікатором стилів видань і створенням бази еталонних видань різних стилів для ефективного оброблення різномірної інформації [14].

Концептуальна модель автоматизованого оброблення та подання неструктурованих текстів

Запропонована концептуальна модель є описом технології автоматизованого оброблення різностильових документів глобального середовища й подання їх у формі, придатній для подальшого їх перетворення в активний формат інтерактивних баз знань.

Структура моделі має три складники:

- модель онтолого-керованої ідентифікації інформації;

– модель класифікації природномовного тексту за стилем;

– модель трансдисциплінарної інтеграції інформаційних ресурсів.

Розглянемо кожний із трьох складників.

Модель онтолого-керованої ідентифікації інформації

Для ідентифікації інформації може бути використаний метод рекурсивної редукції [15]. У цьому разі основним недоліком методу є те, що правила, застосовані для задання шаблонів ідентифікації, подані в предикативній формі, не зручній для користувача. Ефективність процесу створення бази правил можна значно підвищити, побудувавши перетворення, що приводило б до предикативної форми онтологічно задані описи інформації, яку необхідно ідентифікувати. У такому разі можна говорити про процес онтолого-керованої рекурсивної редукції.

Онтологія, що задаватиме такий опис, має максимально повно описувати предметну галузь (ПГ), тобто бути активною онтологією такого вигляду [16]:

$$O = \langle X, R, F, A, (D, R_S) \rangle, \quad (1)$$

де X – кінцева множина концептів (понять) заданої ПГ;
 R – кінцева множина семантично значущих відношень між концептами ПГ;

$F: X \times R$ – кінцева множина функцій інтерпретації (дій), заданих на концептах і/або відношеннях;

A – кінцева множина аксіом, що використовуються для запису завжди істинних висловлювань (визначень і обмежень) у термінах операціональної тематики ПГ;

D – кінцева множина додаткових визначень понять у термінах операціональної тематики ПГ;

R_S – кінцева множина обмежень, що визначають сферу дії понятійних структур в операціональному середовищі людини.

Однак користувачам зручно редагувати стандартні онтології вигляду (2). Для забезпечення максимальної ефективності процесу створення правил потрібно інтерпретувати множину атрибутів стандартної онтології як елементи активної онтології (1) [17].

$$O_{st} = \langle X, R, F(A'), A(A'), D(A'), R_S(A') \rangle. \quad (2)$$

Для цього необхідно побудувати перетворення інтерпретації атрибутів:

$$O_S \xrightarrow{G_{O_t}} O_{st}. \quad (3)$$

Активна онтологія вигляду (1) може бути перетворена в набір правил для рекурсивного

редуктора за допомогою спеціалізованого перетворення:

$$R_s(A') \xrightarrow{G_{rd}} f_{ap}^g, \quad (4)$$

$$F(A') \xrightarrow{G_{rd}} f_{tr}^g. \quad (5)$$

Складник формування функції застосовності (4) є достатньо простим і зводиться до інтерпретації відповідних атрибутів як предикативних виразів, після чого метод рекурсивної редукції може використовуватися без змін. Складник формування функції перетворення (5) потребує модифікації безпосередньо методу для того, щоб динамічно враховувати задані онтологією формати результату.

Насамперед функція перетворення f_{tr}^g призначена для формування об'єктів і відношень у результуючій онтології (1). Однак у завданні оброблення текстів різних стилів додатково потрібна класифікація документів. Для коректної класифікації необхідно, крім власне назв об'єктів, виділяти і їх контексти. Для кожного з компонентів оператора редукції функції перетворення, що містяться у відповідних правилах, матимуть певну структуру.

Функція створення об'єкта використовується в правилах, що визначають оператор ідентифікації об'єкта F_x , і має вигляд

$$f_{tr}^g(l_1, \dots, l_n) = X(N(l_1, \dots, l_n)), \quad (6)$$

де X – операція створення об'єкта із заданою назвою.

Функція створення зв'язків є більш складною (7). Ці функції застосовуються в правилах, що визначають оператор ідентифікації відношень. Завдання цієї функції полягає у визначенні двох об'єктів і створенні зв'язку між ними.

$$f_{tr}^g(l_1, \dots, l_n) = R(X(N(l_1, \dots, l_m)), X(N(l_{m+1}, \dots, l_n))), \quad (7)$$

де X – операція створення (або виділення) об'єкта із заданою назвою;

R – операція створення зв'язку між двома заданими об'єктами;

m – індекс, який вказує межу між іменами об'єктів у вхідній послідовності лексеми.

Функція створення атрибутів має вигляд (8). Цей тип функції часто потребує спеціалізованих процедур для визначення об'єкта, до якого належить атрибут.

$$f_{tr}^g(l_1, \dots, l_n) = A(N(l_1, \dots, l_m), N(l_m, \dots, l_n)), \quad (8)$$

де A – операція створення атрибута за його ім'ям та значенням;

m – індекс, що вказує межу між іменем та значенням.

*Модель класифікації
природномовного тексту за стилем*

Для вирішення завдання класифікації текстів за стилями може використовуватися механізм зростання пірамідальної мережі (ЗПМ) [18]. Цей спосіб забезпечує формування понять, ієрархічне упорядкування та класифікацію вхідної інформації на основі виявлення існування об'єднувальної властивості, що є загальною для двох понять.

Для здійснення класифікації необхідний власне опис стилів – у вигляді онтологічного реєстру. Для побудови онтологічного реєстру стилів експертним чином був оброблений масив наукових, навчальних, законодавчих, відомчих, публіцистичних і частково художніх документів. Унаслідок цього була побудована таксономічна структура функціональних стилів мови, а також визначені атрибути об'єктів, що належать до основних стилів.

Такий реєстр може бути поданий як активна онтологія за схемою (1), і в подальшому застосовуватися як база правил для методу онтолого-керованої рекурсивної редукції.

Об'єктами цього класифікатора є типові види документів, що належать до відповідного стилю. Об'єкти мають атрибути, що й описують особливості оформлення тексту конкретних документів.

Отже, можна задати особливості текстової розмітки типових документів, таких як закони, стандарти, положення, інструкції, наукові звіти тощо.

ЗПМ може формуватися на основі цього реєстру, результатів роботи методу онтолого-керованої рекурсивної редукції:

$$O \cup O_S \xrightarrow{G_T} T_S, \quad (9)$$

де O – онтологія, що містить результати методу рекурсивної редукції;

O_S – онтологічний реєстр стилів;

T_S – класифікаційна таксономія, що має структуру:

$$T_S = \langle X_T, R_T \rangle, \quad (10)$$

де X_T – множина об'єктів, що належать таксономії;

R_T – множина зв'язків, що містяться в таксономії.

Множина X_T складається з об'єктів X_S початкової онтології O_S , а також множини об'єктів, що є класифікаційними властивостями відповідних стилів (побудованих на основі атрибутів A'_S об'єктів X_S):

$$X_T = X_S \cup X(A'_S). \quad (11)$$

Множина R_T містить взаємозв'язки між об'єктами X_T , що є стилями, і об'єктами $X(A'_S)$, які є класифікаційними характеристиками об'єктів:

$$R_T = R(X_S, X(A'_S)). \quad (12)$$

Для таксономії T_S можна побудувати ЗПМ, яка буде унівалентною до неї:

$$T_S \xrightarrow{G_\Psi} \Psi_S, T_S \cong \Psi_S. \quad (13)$$

*Модель трансдисциплінарної інтеграції
інформаційних ресурсів*

Принципи трансдисциплінарної інтеграції політематичних інформаційних ресурсів глобального середовища забезпечують процеси консолідованої взаємодії складних інформаційних систем – коректного використання мережних інформаційних ресурсів, що створені за різними стандартами, мають неоднакові формати й обробляються різними інформаційними системами, які не мають спільних інтерфейсів.

Для реалізації такої інтеграції пропонується застосування онтологічного шаблону подання разом із розширенням онтологій контекстами та використанням до них функцій пошуку й контекстної зв'язності [19].

Онтологічний шаблон подання – це вид онтології, призначений для визначення додаткових модулів натуральної системи. Ці модулі можуть бути включені в структуру системи, змінюючи її поведінку відповідно до вимог завдання.

Необхідно, щоб узагальнена інформаційна модель натуральної системи, яка підтримує онтологічні шаблони подання, мала такий вигляд:

$$P_{SN} = \sum_{i=0}^n P_{SN}^i \cup G_T(O_D), \quad (14)$$

де P_{SN}^i – стандартні модулі, що забезпечують основні функції оброблення та відображення даних;

G_T – перетворення інтерпретації онтологічного шаблону подання;

O_D – онтологічний шаблон подання.

Основним стандартним модулем такої натуральної системи є системний контролер, що спостерігає за взаємодією між іншими модулями, оскільки вони виконують цільову функцію системи. Системний контролер забезпечує перетворення інтеграції функцій окремих модулів.

$$G_C : \bigcup_{i=0}^n S_i \cup S_T(O_D) \rightarrow \tilde{f}, \quad (15)$$

де G_C – перетворення інтеграції;

S_i – функції стандартних модулів Π_{SN}^i ;

$S_T(O_D)$ – функції, отримані внаслідок інтерпретації онтологічного шаблону подання.

Інтерпретація поділяється на два паралельні процеси – створення функцій оброблення даних і функцій відображення даних.

$$S_T(O_D) = \sum_{x \in X_D} G_Q(x) \cup \sum_{x \in X_D} G_D(x), \quad (16)$$

де X_D – сукупність об'єктів, що належать до онтології O_D ;

G_Q і G_D – перетворення інтерпретації, призначені для створення функцій оброблення даних і подання відповідно.

Завдання трансдисциплінарної інтеграції інформації вирішується шляхом перетворення розширення контекстами об'єктів онтології, здобутої внаслідок роботи методу рекурсивної редукції.

$$W^T \rightarrow X_t(W^T), \quad (17)$$

де W^T – контекст;

X_t – концепт, що міститься в контексті.

У подальшому такі онтології використовуються як вхідні дані для функції пошуку.

$$Q_S(H, x) = \{H \langle \{V(l) \times V(x)\} \rangle\}, \quad (18)$$

де H – індекс, отриманий унаслідок індексації масиву наративів мережних документів за допомогою спеціалізованої функції індексації Q_H ;

$V(l), V(x)$ – ідентифікатори лексеми l і об'єкта x , що належать онтології O .

Функція пошуку дає змогу формувати зв'язки між контекстами всіх лексичних одиниць безлічі мережних документів. Ця операція є основною для побудови функції контекстної зв'язності:

$$Q_C(L_x, C) = \bigcup_{O \in C} (Q_S(Q_H(O), L_x)), \quad (19)$$

де C – множина онтологій O , що описують одну або кілька ПГ;

L_x – текстове подання контексту лексичної одиниці x , що належить таксономії T .

Порядок взаємодії розроблених підсистем у межах спеціалізованого застосування

Для реалізації спеціалізованого застосування "система трансдисциплінарного подання інформаційних ресурсів різних стилів" створено такі модулі (підсистеми):

- модуль інтерпретації онтології стилів;
- модуль формування ЗПМ;
- модуль класифікації тексту за стилем.

Взаємодія підсистем відбувається в певній послідовності.

1) Під час запуску спеціалізованого застосування онтологія стилів витягується зі сховища та за допомогою модуля інтерпретації онтології стилів перетворюється в базу правил редукції.

2) Запускається редукція ПМТ.

3) На основі результатів редукції формується ЗПМ у відповідному модулі.

4) Створена ЗПМ подається до модуля класифікації тексту за стилем, де і відбувається класифікація тексту на основі операцій порівняння.

5) Отримана класифікація подається на вхід рекурсивного редуктора, що дає змогу повторити редукцію з більшою точністю та дістати кінцевий результат – інформаційну онтологію.

6) Сформована онтологія відображається інтерфейсом КІТ "Полієдр" у вигляді інтерактивного документа.

7) Елементи отриманого інтерактивного документа можуть бути пошуковим запитом, виконавши який за допомогою індексації, система надає користувачеві трансдисциплінарно інтегрований масив інформації.

Тобто, основний процес системи оброблення та трансдисциплінарного подання IP різних стилів полягає в розширенні функціональності та підвищенні ефективності рекурсивної редукції шляхом застосування дворівневої схеми оброблення (з додатковою класифікацією вхідних текстів за стилем), що значно підвищує точність вихідного результату та зменшує кількість помилок оброблення.

Приклад застосування системи автоматизованого оброблення та подання великих масивів неструктурованих текстів

Великим масивом неструктурованих текстів обрано інформаційну базу знань наукової продукції (ІБЗ НП), навчальні програми, а також навчально-дослідницькі проекти НЦ "Мала академія наук України". Трансдисциплінарне подання цих документів допоможе:

- синхронізувати інформаційні ресурси, що відображають науково-технічну продукцію (НТП) з навчальними програмами для визначення якості та повноти наявної в ІБЗ НП системи знань;
- синхронізувати інформаційні ресурси, що відображають науково-технічну продукцію (НТП)

з навчально-дослідницькими проєктами НЦ "МАНУ" для визначення якості цих проєктів.

В обох випадках синхронізація здійснюється між ресурсами в межах ІБЗ НП, що означає необхідність внесення в неї програм і проєктів відповідно. Оскільки обидва типи документів є слабкоструктурованими, витриманими в різних стилях, до них спочатку застосовуються технологічні засоби структуризації.

Приклад навчальної програми, що обробляється, показано на рис. 1. Така програма містить значну кількість інформації, що загалом зводиться до переліку ключових слів. Ці слова необхідно виділити з тексту програми, класифікувати й налаштувати процеси автоматизованої оцінки наявних в ІБЗ НП інформаційних ресурсів на її основі.

Компетентнісний потенціал навчального предмета

<p>1. Спілкування державною (і рідною у разі відмінності) мовами</p>	<p>Уміння: усно й письмово тлумачити біологічні поняття, факти, явища, закони, теорії; описувати (усно чи письмово) експеримент, послуговуючись багатим арсеналом мовних засобів — термінами, поняттями тощо; обговорювати проблеми біологічного змісту.</p> <p>Ставлення: усвідомлення значущості здобутків біологічної науки, зокрема пошанування досягнень українських учених; прагнення до розвитку української біологічної термінологічної лексики.</p> <p>Навчальні ресурси: навчальні, науково-популярні, художні тексти про природу, дослідницькі проєкти в галузі біології, усні / письмові презентації їх результатів</p>
--	--

Рис. 1. Приклад фрагмента навчальної програми

Оскільки в межах поставленого завдання структура самої програми не має значення, це дає змогу обробляти їх за спрощеною схемою –

з допомогою лексикографічних модулів. Відповідний дескриптор структуризації показано на рис. 2.

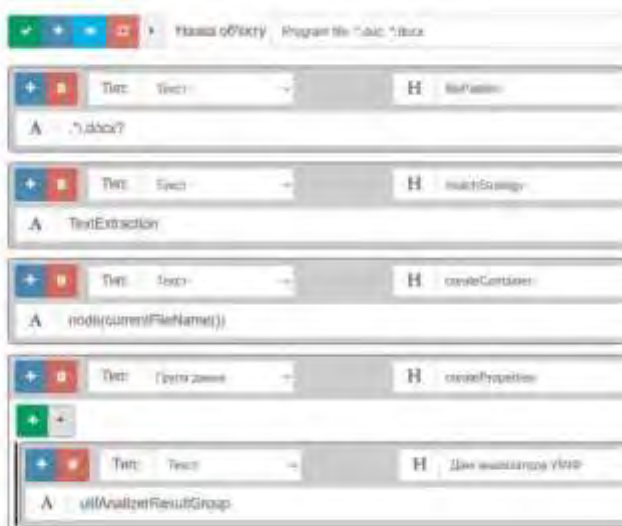


Рис. 2. Онтологічний дескриптор структуризації навчальної програми

Наведений варіант дескриптора дає змогу робити одну інформаційну онтологію на основі масиву програм. Унаслідок утворюється онтологія (рис. 3), що містить самі програми як об'єкти, а отримані

з них терміни – як атрибути. Експерт може використовувати такі онтології разом із наявними механізмами повнотекстового пошуку та встановлювати ступінь відповідності матеріалів програми.

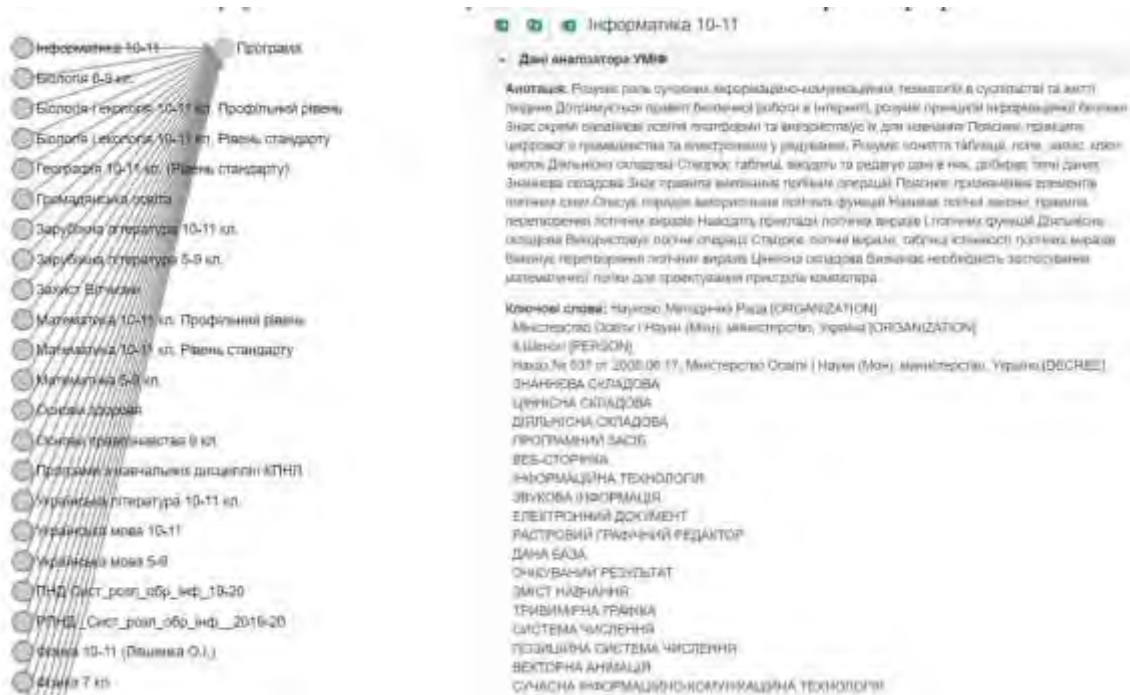


Рис. 3. Результат структуризації масиву навчальних програм

За результатами такого аналізу доповнюються або модифікуються наявні в ІБЗ НП інформаційні ресурси.

Для навчально-дослідницьких проєктів НЦ "МАНУ" використовується дещо інший підхід, що враховує структуру документа. Крім власне ключових слів, що також виділяються з таких проєктів, аналізується і структура безпосередньо документа та його складові частини.

У процесі створення онтології (рис. 4) до атрибутів об'єкта додається власне вихідний текст учнівського проєкту, розбитий на атрибути типу "Група" відповідно до вкладеності розділів. Таким чином під час аналізу роботи експерт може переглядати не тільки ключові слова, але й контекст, у якому ці вони вживаються в роботі. Такий підхід забезпечує більш повне відображення роботи.

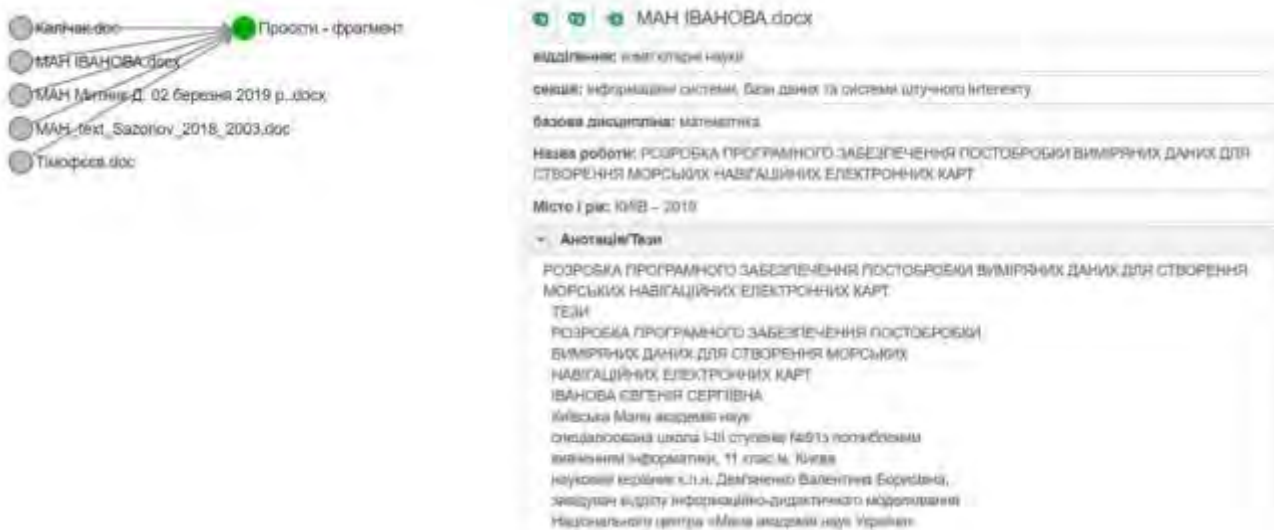


Рис. 4. Приклад обробки навчально-дослідницького проєкту

Зазначені вище термінологічні онтології не є кінцевим результатом. Вони є першим кроком до ефективного подання знань про НТП. Другим кроком

є формування онтології пошукового запиту, що може здійснюватися в кілька способів. Найпоширеніший з них – оброблення термінологічної онтології

експертно (рис. 5). Експерт відбирає з наявного списку ті терміни, що вважає релевантними своєму завданню, і вносить їх в електронну таблицю.

Сформована онтологія (рис. 6) відображає бачення експерта на структуру його завдання. Залежно від структури завдання може мати певну ієрархію або бути однорівневим (як показано на рисунку).

Така онтологія використовується для інтегрованого подання інформації про НТП у форматі онтологічної пошукової призми (рис. 7). Кожна грань такої призми є певним елементом ПГ у межах завдання експерта, а елементи на грані призми є інформаційними ресурсами, релевантними цьому елементу.

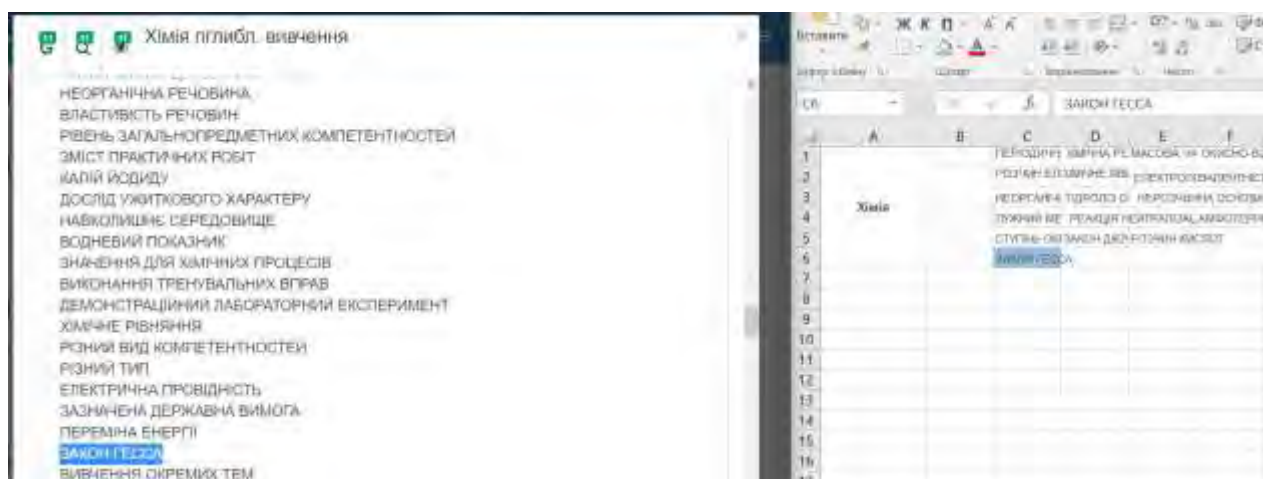


Рис. 5. Формування онтології пошукового запиту

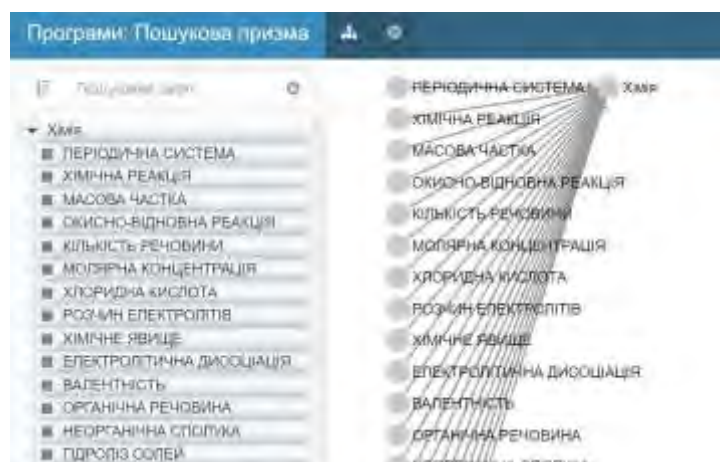


Рис. 6. Онтологія пошукового запиту

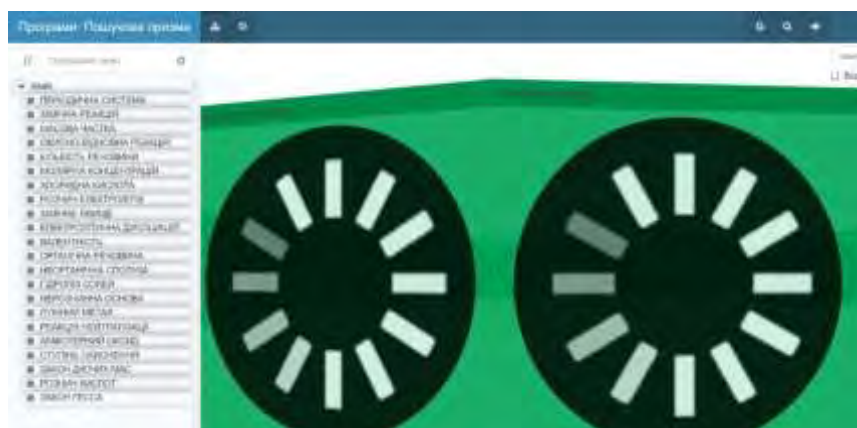


Рис. 7. Онтологічна пошукова призма НТП

Висновки

Отже, у статті вирішена актуальна науково-технічна проблема систематизації великих масивів неструктурованих текстів у глобальному середовищі шляхом розроблення моделі, методу й засобів їх трансдисциплінарного подання та інтеграції.

Обґрунтовано переваги онтолого-керованих засобів оброблення та подання неструктурованих текстів.

Набув подальшого розвитку метод рекурсивної редукції шляхом побудови перетворення, що приводить до предикативної форми онтологічно задані описи інформації.

Викладені ідеї ефективного пошуку, оброблення, класифікації та вибору необхідної інформації.

Перспективи подальшого розвитку

Розглядається можливість поширення здобутих результатів проєктування засобів онтолого-керованого трансдисциплінарного подання великих масивів неструктурованої інформації для оптимізації роботи експертів за необхідності вилучення із множини текстових документів знань, релевантних до заданої предметної галузі та здійснення їх системно-онтологічної структуризації. Структуроване подання інформації є важливим етапом для подальшої реалізації функцій систем підтримки прийняття рішень. Тому знання-орієнтовані експертні бібліотеки і репозиторії галузевих документів можуть створюватися у сфері державного управління, промисловості, науки, освіти, засобів масової інформації тощо.

Список літератури

1. Павленко П. М., Філоненко С. Ф., Бабіч К. С. та ін. Інформаційні системи і технології. Київ : НАУ, 2013. 324 с.
2. Jones K. S. Natural language processing: a historical review. 1994. URL: <https://aclanthology.org/www.mt-archive.info/Zampolli-1994-Sparck-Jones.pdf> (дата звернення: 10.05.2021)
3. Liddy E. D. Natural Language Processing. *Encyclopedia of Library and Information Science*. NY : Marcel Decker, Inc. 2001.
4. Jurafsky D., Martin G. H. Speech and Language Processing. Prentice Hall. 2000. URL: <https://web.stanford.edu/~jurafsky/slp3> (дата звернення: 10.05.2021)
5. Barkovska O., Khomych V., Nastenka O. Дослідження методів обробки та аналізу тексту при організації електронних сховищ інформаційних об'єктів. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2022. № 1 (19). С. 5–12. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.19.005>
6. Praveena S., Justus S. A Study on Knowledge Representation Models. *European Journal of Molecular and Clinical Medicine*. 2020. вип. 7. № 4. С. 2446–2452.
7. Субботін С. О. Подання й обробка знань у системах штучного інтелекту та підтримки прийняття рішень. Запоріжжя: ЗНТУ, 2008. 341 с.
8. Yang L., Cormican K., Yu M. Ontology-based systems engineering: A state-of-the-art review. *Computers in Industry*. 2019. вип. 111. С. 148–171. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.05.003>
9. Басюк Т. М., Досин Д. Г., Литвин В. В. *Онтологічний інжиніринг*. Львів : Вид-во Львівської політехніки. 2017. 224 с.
10. Інструкція користувача КІТ "Поліедр". 2020. URL: https://storage.ulif.org.ua/storage/instructions/polyhedron_instruction.pdf (дата звернення: 10.05.2021)
11. Lawrence M., Williams S., Nanz P., Renn O. Characteristics, potentials, and challenges of transdisciplinary research. *One Earth*. 2022. вип. 5. № 1. С. 44–61. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.12.010>
12. Renn O. Transdisciplinarity: Synthesis towards a modular approach. *Futures*. 2021. вип. 130. С. 1–18. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.futures.2021.102744>
13. Гончар А. В., Стрижак О. Є., Беркман Л. Н. Трансдисциплінарна консолідація інформаційних середовищ. *Зв'язок*. 2021. № 1(149). С. 3–10. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2021.010310>
14. Гайко С. І., Приходнюк В. В. Підхід до автоматизованої структуризації освітніх ресурсів на основі методу рекурсивної редукції. *Наукові записки Малої академії наук України*. 2021. № 1 (20). С. 28–38. DOI: <https://doi.org/http://doi.org/10.51707/2618-0529-2021-20-03>
15. Приходнюк В. В. Технологічні засоби трансдисциплінарного представлення геопросторової інформації: дис. канд. техн. наук. Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору. 2017. 267 с.
16. Стрижак О. Є., Приходнюк В. В., Гайко С. І., Шаповалов В. Б. Відображення мережевої інформації у вигляді інтерактивних документів. Трансдисциплінарний підхід. *Математичне моделювання в економіці*. 2018. № 3. С. 87–100.

17. Гайко С., Приходнюк В. Средства трансдисциплинарного представления информационных ресурсов разных стилей. *Information Models and Analysis*. Sofia : ITHEA, 2020. вип. 9. № 1. С. 78–99.
18. Величко В. Ю. Алгоритм побудови зростаючих пірамідальних мереж у паралельному обчислювальному середовищі. *Комп'ютерні засоби мережі та системи*. 2011. № 10. С. 50–57.
19. Dovgyi S., Stryzhak O. Transdisciplinary Fundamentals of Information-Analytical Activity. *Advances in Information and Communication Technology and Systems. MCT 2019. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2019. вип. 152. DOI: https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-58359-0_7

References

- Pavlenko, P. M., Filonenko, S. F., Babich, K. S. and others. (2013), *Information systems and technologies*, Kyiv, NAU, 324 p.
- Jones, K. S. (1994), "Natural language processing: a historical review", available at: <https://aclanthology.org/www.mt-archive.info/Zampolli-1994-Sparck-Jones.pdf> (last accessed: 10.05.2021)
- Liddy, E. D. (2001), "Natural Language Processing", *Library and Information Science*, New York, P. 15–25. DOI: <https://doi.org/10.1145/234173.234180>
- Jurafsky, D., Martin, G. H. (2000), "Speech and Language Processing", Prentice Hall, available at: <https://web.stanford.edu/~jurafsky/slp3/> (last accessed: 11.01.2023).
- Barkovska, O., Khomych, V., Nastenka, O. (2022), "Study of text processing and analysis methods in the organization of electronic storage of information objects", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, No 1 (19), P. 5–12. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.19.005>
- Praveena, S., Justus, S. (2020), "A Study on Knowledge Representation Models", *European Journal of Molecular and Clinical Medicine*, Vol 7, No. 4, P. 2446–2452.
- Subbotin, S. O. (2008), *Presentation and processing of knowledge in artificial intelligence and decision support systems*, Zaporizhzhia, 108 p.
- Yang, L., Cormican, K., Yu, M. (2019), "Ontology-based systems engineering: A state-of-the-art review", *Computers in Industry*, No. 111, P. 148–171. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.05.003>
- Basyuk, T. M., Dosyn, D. G., Lytvyn, V. V. (2017), *Ontological engineering*, Lviv, 224 p.
- "KIT "Polyhedron" user manual", (2020), available at: https://storage.ulif.org.ua/storage/instructions/polyhedron_instruction.pdf (last accessed: 12.08.2021)
- Lawrence, M., Williams, S., Nanz, P., Renn, O. (2022), "Characteristics, potentials, and challenges of transdisciplinary research", *One Earth*, Vol. 5, No. 1, P. 44–61. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.12.010>
- Renn, O. (2021), "Transdisciplinarity: Synthesis towards a modular approach", *Futures*, Vol. 130, P. 1–18. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.futures.2021.102744>
- Gonchar, A. V., Stryzhak, O. E., Berkman, L. N. (2021), "Transdisciplinary consolidation of information environments" ["Transdy'scy`plinarna konsolidaciya informacijny`x seredovy`shh"], *Connection [Zv'yazok]*, No. 1(149), P. 3–10. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2021.010310>
- Haiko, S. I., Prykhodnyuk, V. V. (2021), "Approach to the automated structuring of educational resources based on the method of recursive reduction", *Scientific notes of the Junior Academy of Sciences of Ukraine*, No. 1 (20), P. 28–38. DOI: <https://doi.org/http://doi.org/10.51707/2618-0529-2021-20-03>
- Prikhodniuk, V. V. (2017), *Technological means of transdisciplinary presentation of geospatial information [Texnologichni zasoby` transdy'scy`plinarnogo predstavleniya geoprostorovoyi informaciyi]*, Ph.D. thesis, Institute of Telecommunications and Global Information Space, 267 p.
- Stryzhak, O. E., Prykhodnyuk, V. V., Haiko, S. I., Shapovalov, V. B. (2018), "Display of network information in the form of interactive documents. Transdisciplinary approach" ["Vidobrazhennya merezhevoyi informaciyi u vy`glyadi interakty`vny`x dokumentiv. Transdy'scy`plinarny`j pidxid"], *Mathematical modeling in economics*, No. 3, P. 87–100.
- Gaiko, S., Prikhodnyuk, V. (2020), "Means of transdisciplinary presentation of information resources of different styles" ["Sredstva transdistsiplinarnogo predstavleniya informatsionnykh resursov raznykh stiley"], *Information Models and Analysis*, Sofia, ITHEA, Vol. 9, No. 1, P. 78–99.
- Velichko, V. Yu. (2011), "Algorithm for building growing pyramidal networks in a parallel computing environment" ["Algory`tm pobudovy` zrostayuchy`x piramidal`ny`x merezh u parale`nomu obchy`clyuval`nomu seredovy`shhi"], *Network and system computer tools*, No. 10. P. 50–57.

19. Dovgyi, S., Stryzhak, O. (2019), "Transdisciplinary Fundamentals of Information-Analytical Activity", *Lecture Notes in Networks and Systems*, Vol. 152. DOI: https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-58359-0_7

Received 16.05.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Гайко Світлана Іванівна – Інститут телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України, молодший науковий співробітник, Київ, Україна; e-mail: svitgai@i.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3564-475X>

Haiko Svitlana – Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Junior Researcher, Kyiv, Ukraine.

ONTOLOGY-DRIVEN MEANS FOR PROCESSING AND PRESENTATION OF LARGE ARRAYS OF UNSTRUCTURED TEXTS

The **subject** of the article's research is methods of ontology-driven processing and presentation of unstructured texts in a global environment. The **goal** of the work is to improve the efficiency of automatic search, classification and selection of the necessary information contained in electronic publications in an unstructured form by developing a model, method and means of automated processing and transdisciplinary presentation of text documents created in Ukrainian, Russian and English languages. In accordance with the goal, the following **tasks** were set: to conduct an overview of models of processing and presentation of unstructured texts, to identify the advantages of information systems with an ontology-driven architecture, to develop a conceptual model and means for automated processing and transdisciplinary presentation of text documents, improve the method of recursive reduction, with the help of developed method and means to process a large array of unstructured texts (in particular information base of knowledge of scientific products (IBK SP), educational programs, as well as educational and research projects of the National Center "Junior Academy of Sciences of Ukraine"), to present them in a form that allows to reveal the quality and completeness of the knowledge system available in the databases and, thus, experimentally to confirm the effectiveness of the developed means. The conducted research is based on the following **methods**: systemological classification, algebraic-logical and axiomatic methods, the method of recursive reduction. The following **results** were obtained: the existing models of processing and presentation of unstructured texts were described, the technological aspects of the ontology-driven approach to the processing and presentation of large arrays of network documents were improved, the technology of forming ontologies of documents based on the representation of their taxonomies, connections between their contexts and multiple representations was developed, which provides effective search for information in unstructured texts. **Conclusions**: The advantages of ontology-driven means for processing and presentation unstructured texts are substantiated. The method of recursive reduction by constructing a transformation, which leads to the predicative form of ontologically given descriptions of information, gained further development. The idea of effective search, processing, classification and selection of the necessary information has gained further development.

Keywords: unstructured texts; ontology; recursive reduction; taxonomy; texts processing; presentation of information.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Гайко С. І. Онтолого-керовані засоби оброблення та подання великих масивів неструктурованих текстів. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 2 (24). С. 27–38. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.027>

Haiko, S. (2023), "Ontology-driven means for processing and presentation of large arrays of unstructured texts", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (24), P. 27–38. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.027>

D. GOBOV, O. ZUIEVA

IDENTIFYING THE DEPENDENCIES BETWEEN IT PROJECT CONTEXT AND BUSINESS ANALYSIS DOCUMENT CONTENT

The subject matter of the article is software requirements documentation practices in IT projects. **The goal** of the work is to identify what information is included in business analysis deliverables and how the project context influences the content of business analysis documents. The following **tasks** were solved in the article: to examine the industrial standards and experience of business analysts and requirements engineers in requirements specification and modeling activities in software development, to create and conduct a survey on practices in requirement documentation activities in IT projects, to define practitioners' preferences regarding business analysis documents' content, and to define how project context influences document content. The following methods are used: three hundred and twenty-four practitioners from Ukrainian companies were surveyed about their current preferences in business analysis document creation, their experience, and project profile attributes in which techniques were used. The Chi-Square test of independence and Cramer's V effect size measure were applied to define statistically significant dependencies between project context and business analysis document content. The following results were obtained: a list of the most commonly used elements in business analysis documents was defined. Seventy-eight statistically significant associations for pairs "project context – business analysis document content" were found based on the p-value of the Chi-Square test, for eighteen of which the significance of the identified dependencies was confirmed using the Cramer's V effect size measure. **Conclusions:** It is concluded that project context influences the content of business analysis documents in IT projects. The most influential factors are the business analyst's experience, team distribution, company size and type, template usage, and the purpose of using the requirements documents. The found dependencies can guide the selection of business analysis document structure and the creation of project-specific templates during the creation business analysis approach and business analysis information management approach.

Keywords: business analysis document; requirements engineering; project context; Cramer V; empirical study.

Introduction

According to the Project Management Institute (PMI) definition in [1], business analysis is the set of activities performed to support the delivery of solutions that align with business objectives and provide continuous value to the organization. In most cases, the solution includes an IT component in the form of software, hardware, or software-hardware systems. The primary outcomes of business analysis activities, including IT projects, are requirements and design, which define needs and solutions on different levels. Network analysis of business analysis tasks and artifacts [2] showed that solution scope, future state description, and requirements are the most influential elements. These business analysis outputs laid the groundwork for all future development and testing activities. The form of organizing business analysis results can vary depending on the selected Software Development Life Cycle (SDLC), stakeholders' preferences, company standards, and previous business analysts' experience. All individual models and specifications must be fitted together into requirements architecture to ensure that all requirements form a single whole that supports the

overall business objectives and produces a valuable outcome for stakeholders [3]. Usually, requirement architecture creation starts from predefined templates or frameworks, which can be defined at the company or project level.

Guidelines for business analysis and requirements engineering developed by international specialized organizations PMI [1], IIBA [3], and IREB [4] do not prescribe the structure of business analysis documents. The international standard developed by the IEEE [5] offers three requirements document templates: Stakeholder requirements specification, System requirements specification, and Software requirements specification, of which the latter is focused on describing requirements for software systems. RUP [6], one of the popular iterative software development methodologies, offers a two-level model for describing requirements: a Vision document for describing the top-level boundaries of a solution and a System requirements specification document for describing detailed requirements. The main limitation of these approaches is that they are more focused on plan-driven approaches, while today, most projects are implemented on an adaptive approach. Secondly, these templates are recommendations and should be adapted by business analysts to the project's

specifics. According to a survey [7], only 5% of practitioners use the document templates recommended in the standards, and more than 50% use the standards developed by the company. All this indicates the relevance of studying current practices for creating business analysis documents, their structure, and the impact of the project context on the tasks of documenting requirements.

This study was conducted to analyze the current preferences of business analysts and requirement engineers regarding business analysis documents' content for software development projects. We also wanted to define how a project context influences the probability of choosing specific document content elements. Using a survey, we studied the experience of practicing business analysts and requirement engineers working in Ukrainian and international companies. The survey results were analyzed via statistical analysis in conjunction with the Chi-Square test and Cramer-V measure.

This article is organized as follows. Section II includes a review of related works describing elicitation activities and technique selection. Section III is devoted to the survey results, and section VI includes the result of statistical analysis. Section V concludes the paper with a discussion of the findings of our study and future work.

Analysis of last achievements and publications

Most of the related works are dedicated to analyzing requirements document structure and templates used as a basis for creation. Several of these works are devoted to the analysis of the structure of the document "Software Requirements Specification" (SRS). Rączkowska-Gzowska and Walkowiak-Gall [8] conducted a survey among 163 practitioners from commercial software development projects. The frequency of availability of certain types of information in the SRS and the project context's influence on them were analyzed. The project's domain was found to affect the information in the SRS. For example, the structure of the processed data, reports, and dictionaries were rarely used in the SRS for projects in the telecommunications industry. Statistical analysis was not performed to check the influence between project context and SRS structure nor for the use of templates to develop documentation. Franch, Palomaresm Quer, Chatzipetrou, and Gorschek [9] analyzed current practices regarding artifacts in SRS, templates, and tools for document creation based on the results of

24 interviews at 12 Swedish companies. The most used artifact categories were natural language, use case, and user story. Most respondents used organizational standards. Limited participants did not allow statistical analysis to define dependencies between project context and business analysis artifacts and templates. Wagner, Fernández, Felderer, and Kalinowski [10] studied the practitioners' preferences in functional requirements documenting. The degree of formality and specification techniques were combined to allow participants to select the most appropriate options. The most popular ways to document function requirements were free-form textual domain/business process models, free-form textual structured requirements lists, and use case models. The study [11] presented the result of the worldwide survey where except functional requirements were analyzed ways for specification of non-functional requirements.

Other business analysis outputs such as business requirements, user interfaces, and assumptions, were not analyzed. Abdalazeim and Meziane [12] reviewed existent approaches of generation natural language specifications from the object UML model. Medeiros et al. [13] studied requirements document content in agile projects. The approach Requirements Specification for Developers was proposed. This approach assumes that each functional and non-functional requirement is defined in terms of data entities model, acceptance criteria, and user interface mockup points of view, while the last one is non-mandatory. An industrial case study was performed to evaluate the proposed approach and showed that this approach allows business analysts to meet the developer's expectations in most cases. The disadvantages of this approach include ignoring business and stakeholder requirements, as well as ignoring modeling techniques. Heck and Zaidman [14] studied quality criteria for Requirements Specifications in Agile projects. Twenty-eight quality criteria were described and categorized. One of the most important quality criteria for agile and plan-driven projects is completeness on the single requirement's level and requirement specification document's level.

A set of studies is dedicated to analyzing business analysis techniques used to specify and model requirements. Despite the fact that they do not directly analyze the composition of business analysis artifacts, such techniques as the user story, the use case, and the family of UML diagrams significantly affect the content of business analyst outputs. Jarzębowski and Połocka [15] conducted a study that involved 42 professionals from Polish IT companies. The survey asked the

participants to indicate which requirement specification or modeling techniques they considered applicable to different projects. The survey allowed respondents to choose from a list of 15 techniques, and they could choose any number of techniques that they considered applicable to the given context. However, due to the limited number of participants, the study did not evaluate the statistical significance of the results. Moreover, the survey only captured the participants' preferences, not their current practices. Gobov [16] analyzed the current practices of using specification and modeling techniques in IT projects implemented in Ukraine. The study identified the most commonly used requirements analysis techniques in IT projects: use case, user story, and acceptance criteria were defined as the most popular specification techniques; activity diagram, business process model, and sequence diagram were identified as the most popular modeling techniques. Statistically significant relationships between the context of the project and the techniques used in it were also identified. At the same time, these studies do not define the structure and content of business analysis documents.

Based on the results of the analysis of existent publications, it can be concluded that the task of choosing content for business analytical documents in IT projects remains relevant and unresolved.

The purpose of this article is to identify current practices regarding business analysis document content and to define the influence of project context on it.

Solving of the problem

A survey was conducted to collect information on current practices for creating business intelligence documents, which was attended by 328 practicing business analysts and requirements engineers from Ukrainian and foreign companies. The structure of the questionnaire in terms of information about the context of the project was built based on the questionnaire from the NAPIRE initiative [11]. The list of possible sections in business analysis documents was compiled based on international standards and templates reviewed in the literature review and contained the following options:

- Assumptions
- Background (rationale and context for the new solution decision)
- Business requirements
- Business rules
- Constraints

- Cost-benefit analysis
- Data models
- Dependencies/Integrations
- Deployment specifics
- Functional requirements
- Glossary
- Goals & Objectives
- Non-functional requirements
- Open questions
- Problem statement
- Risks
- Stakeholders analysis (including target audience/personas)
 - Success metrics (project/solution)
 - Technical Interfaces
 - Usage scenarios
 - User interface(s)

Four participants were excluded from the analysis as they did not provide complete information about the project context. The survey was shared in English and Ukrainian languages, and Google Forms was used as the platform for data collection. The survey was subsequently distributed within the local Business Analysis communities and via professional and social networks, along with personal contacts established within the top 10 Ukrainian IT companies. The data collection period spanned one month, during which the responses were gathered. Following this phase, the collected data underwent merging and coding processes in preparation for further analysis. The survey results dataset has been made publicly available through the Mendeley Data repository.

According to the survey results illustrated in Fig. 1, the majority of respondents (69%) identified functional requirements as the most crucial section in software requirements documents. Business requirements were also commonly included, with 63% of respondents highlighting them in their documents. The high percentage of functional requirements highlighted suggests that this section describes the key features and functionalities of the software, which are typically the primary focus of the development process. Meanwhile, emphasizing business requirements highlights the importance of understanding stakeholders' needs and objectives.

Glossary and non-functional requirements followed closely behind, with 62% and 60% of respondents highlighting them. This indicates the importance of clear communication and understanding of technical

terms and concepts used in the requirements, as well as software quality aspects such as usability, security,

and performance, which are crucial for ensuring that the software meets the expected level of quality.

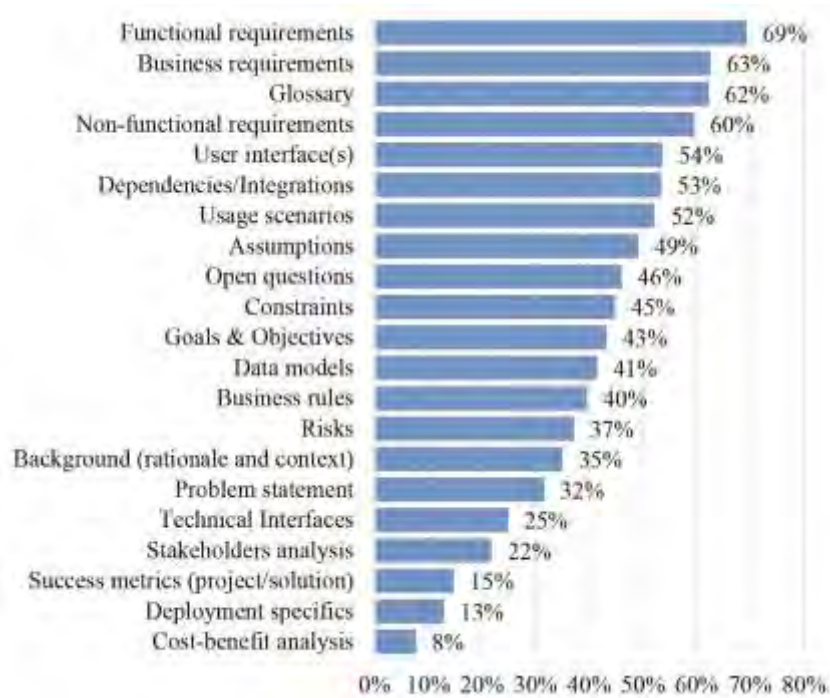


Fig. 1. Business analysis document contents

Other sections and subsections are highlighted in documentation in less than 60% of cases. The least highlighted sections include success metrics (project/solution), deployment specifics, and cost-benefit analysis. Success metrics (project/solution) were highlighted by only 15% of respondents. It suggests that defining and agreeing upon quantifiable and measurable indicators of success can be challenging for different stakeholders. As a result, business analysts may focus on more concrete aspects of software requirements, such as functional and non-functional requirements, leaving success metrics to be defined at a later stage in the software development process.

Deployment specifics (13%) and cost-benefit analysis (8%) were the least highlighted sections. Deployment is typically considered a separate phase of the software development lifecycle, and business analysts may focus on requirements relevant to the design and development phases rather than deployment. Cost-benefit analysis is usually performed at a higher level of project planning, and project managers or other stakeholders may perform it at a later stage in the planning process, which is why business analysts may not include it in the software requirements documentation.

Given that the majority of respondents work on Agile projects, it may have influenced the results. The agile methodology is an approach to software development that emphasizes the rapid delivery of working software over comprehensive documentation, according to one of its basic principles [17]. In [18], it is noted that a complete requirements document is not needed for agile and user-centered design since the requirements change rapidly, making the document quickly outdated and rendering the engineer's efforts mostly wasted. Thus, the software requirements document should define only the minimum functional requirements. As a result, business analysts often prioritize the essential documentation sections, such as functional and business requirements, that are crucial for the success of the development process. Therefore, it is necessary to analyze the relationship between contextual factors such as company type, project approach, etc., and the specific sections of the highlighted business analysis documentation.

The previous analysis examined the relationship between project context factors and documentation section inclusion. The Chi-Square test of independence was used to test the relationship, considering a significance level of 0.05. However, the Chi-Square test

has limitations when comparing tables of different dimensions. Cramer's V, a chi-square-based association measure, was used to adjust the results to address this [19]. Cramer's V ranges from 0 to 1, where 0 indicates no association and 1 represents a perfect association. For this research, we adopted SPSS's definition of effect size: $V \leq 0.2$ for the weak association, $0.2 < V \leq 0.6$ for the moderate association, and $V > 0.6$ for the strong association. The choice to use Cramer's V was justified due to the categorical nature of the variables, the need to assess the strength of association,

the use of contingency tables for analysis, and the availability of a standardized metric for comparison.

An analysis was conducted using Cramer's V statistic to examine the dependencies between context factors, including the business sector, company type, company size, project (team) size, project category, team distribution, way of working, templates usage, experience, and way of using requirements, and the specific sections and subsections that business analysts highlighted in their documentation. The outcomes are presented in Table 1.

Table 1. Cramer's V for project context and document contents associations

Business Analysis Document Contents	Business Sector	Company Type	Company Size	Project (team) Size	Project Category	Team Distribution	Way of Working	Templates Usage	Experience	Requirements used as:				
										basis for the implementation	source for the tests	used in customer acceptance	part of the contract	reminder for further discussions
Assumptions	0	0.231	0.216	0	0	0.201	0.142	0.275	0.191	0	0.207	0	0	0.167
Background	0	0	0	0	0.164	0.173	0	0.214	0.156	0	0.208	0	0.138	0.234
Business requirements	0	0	0	0	0	0	0	0	0.196	0	0	0.128	0	0
Business rules	0	0	0	0	0	0.12	0	0	0.184	0	0	0.181	0	0
Constraints	0	0	0	0	0	0	0	0.186	0.189	0	0.11	0.216	0	0.156
Cost-benefit analysis	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.127	0
Data models	0	0	0	0	0.182	0.143	0	0	0.232	0	0.144	0.122	0	0.183
Dependencies/Integrations	0	0.122	0	0	0	0	0	0.185	0	0	0	0.166	0	0
Deployment specifics	0	0	0	0	0	0	0	0.158	0	0	0	0.128	0.143	0.200
Functional requirements	0	0	0	0	0	0	0	0.185	0.184	0	0.113	0.14	0.117	0
Glossary	0	0	0	0	0	0	0	0	0.167	0.143	0.149	0	0.149	0
Goals & Objectives	0	0	0	0	0	0	0.158	0	0.222	0	0	0	0.224	0.182
Non-functional requirements	0	0	0.136	0	0.208	0	0	0.196	0.221	0	0.165	0	0.174	0.131
Open questions	0	0	0.138	0	0	0.179	0	0	0	0	0.167	0	0	0.13
Problem statement	0	0	0	0	0.166	0	0.152	0	0.229	0	0	0	0	0.161
Risks	0	0	0	0	0	0.12	0	0	0.238	0	0	0	0.111	0.124
Stakeholders analysis	0	0	0	0	0	0	0	0	0.174	0	0	0	0	0
Success metrics	0	0	0	0.163	0	0	0	0	0.18	0	0	0	0	0
Technical Interfaces	0	0	0	0	0	0	0	0	0.172	0	0	0	0	0
Usage scenarios	0	0	0	0	0	0	0	0	0.204	0	0	0.171	0	0.142
User interface	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Based on the data presented in Table 1, it can be concluded that the business sector, or the project's domain, does not have a statistically significant impact on the inclusion of any of the sections presented in the documentation. This may indicate that the content of the documentation is not driven solely by the specific needs of the business sector. Instead, other factors such as the distribution of the development team, the maturity of the organization's software development process, and the business analyst's expertise may be more influential in determining the content of the documentation. While each business sector may have unique requirements and specifications for its software projects,

the overall process of gathering, documenting, and communicating software requirements may be similar across different industries. Business analysts may use similar techniques and methodologies to identify and document software requirements. The sections commonly highlighted in the research (functional requirements, business requirements, glossary, and non-functional requirements) may be considered fundamental components of software requirements documentation necessary for all software projects, regardless of the sector. For example, business analysts may follow a template or framework that is not tailored to the specific needs of the business sector. Furthermore, as mentioned previously, software

requirements often focus on the functionality and behavior of the software system rather than the specific business domain. Therefore, the content of software requirements documentation may not vary significantly across different business sectors, as the focus is on the software system itself rather than the business domain it supports. However, it is essential to note that while the business sector may not have a statistically significant impact on the inclusion of specific sections in software requirements documentation, it may still impact the specific requirements and specifications included in the documentation.

Company type moderately impacts the Assumptions section in software requirements documentation ($V = 0,231$) and weakly impacts the section on system integration and dependencies ($V = 0,122$). A survey revealed that 57% of Outstaff and Outsource IT business analysts highlighted Assumptions, compared to 42% from IT Product companies and 26% from non-IT companies. Outstaff and Outsource IT companies may prioritize Assumptions due to risks in the requirements-

gathering process and are more likely to document system integration and dependencies. IT Product companies may focus on meeting market needs and emphasize assumptions less. In comparison, non-IT companies may have more intimate knowledge of business context and stakeholders and emphasize assumptions less.

Most of the dependencies on contextual factors were found for the Assumptions section: 8 out of 14 contextual factors have a statistically significant impact on the presence of the Assumptions section in the documentation, with 5 of them having a moderate level of influence and 3 being weak. In addition to company types, factors such as company size ($V = 0.216$), team distribution ($V = 0.201$), and template usage ($V = 0.275$), as well as using requirements documentation as a source for tests ($V = 0.207$), have a moderate impact on the use of the Assumptions section by business analysts. The associations between the factors of team distribution and company size and the Assumptions section are presented in Fig. 2.

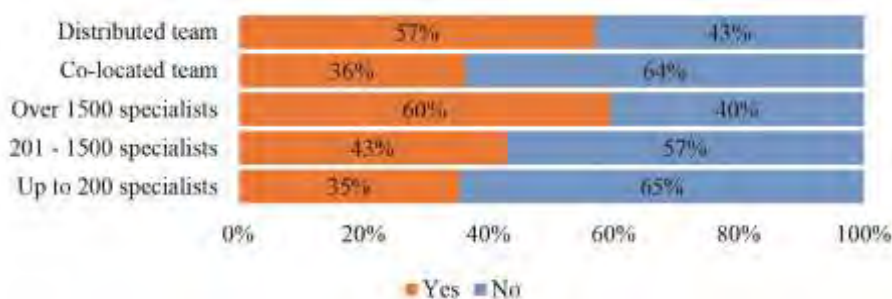


Fig. 2. Team distribution and company size associations to the Assumptions section

From Fig. 2, it can be concluded that in larger companies, where there may be more bureaucracy and a higher level of risk aversion, there may be a greater emphasis on documenting assumptions to ensure that all stakeholders have a shared understanding of the project goals and potential risks. The Assumptions section is used in documentation in 60% of large companies, compared to 35% of small companies. Smaller companies may have a more informal approach to documentation and risk management, which could result in a lower level of emphasis on documenting assumptions. Similarly, the impact of team distribution on using the Assumptions section can be explained by the fact that distributed teams often face more significant communication challenges than co-located teams. In distributed teams, the Assumptions section is used 20% more often than in co-located teams. A distributed team may need

standardized templates and clear documentation to ensure that all team members have a shared understanding of the requirements. The moderate impact of template usage ($V = 0,275$) can be explained by the fact that templates provide a structured format for documenting requirements, making it easier to ensure that all required information is included in the documentation. It can increase the likelihood that the assumptions section is consistently and thoroughly documented across different projects.

Using requirements documentation as a source for tests has a moderate impact on using the Assumptions section ($V = 0,207$) because it provides valuable insights into the intended use and limitations of the software being developed, which can inform the testing process. Thus, a focus on testing may encourage business analysts to document assumptions.

The way of working (WoW) and the number of years of analyst experience have been statistically confirmed to have a weak impact on using the Assumptions section. The impact of the WoW on the usage of the Assumptions section may be weaker than other contextual factors because the documentation practices may be more influenced by the specific organization or project rather than the overall methodology being used. The more substantial influence of company type, company size, team distribution, and template usage factors can explain the weaker impact

of analyst experience. In large distributed teams, the importance of documenting assumptions may be emphasized when training new analysts.

The use of templates not only affects the Assumptions section but also influences the presence of the Background section in the documentation ($V=0.214$), which outlines the necessary context and prerequisites for implementing the solution. The association between an analyst's use of templates and the inclusion of the Background section is shown in Fig. 3.

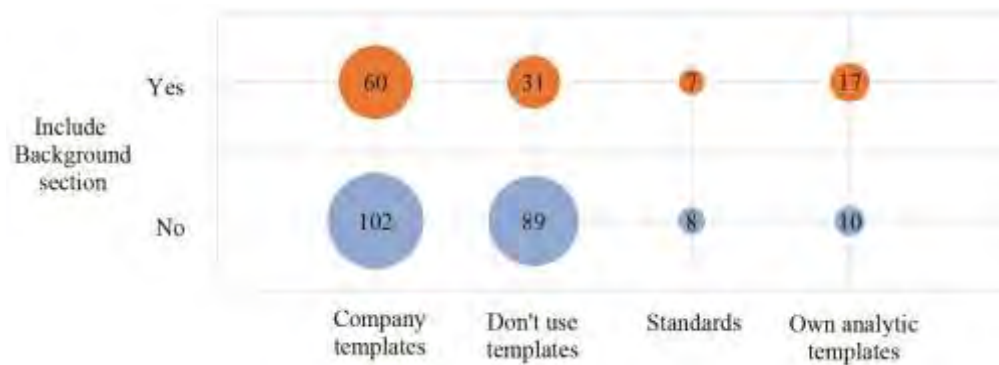


Fig. 3. Templates usage associations to the Background section

According to Fig. 3, most analysts use company-approved documentation templates that typically exclude the Background section. One possible explanation is that the Background section may not be deemed relevant or necessary for the specific project. Sometimes, the focus may be on the system's specific requirements instead of providing a complete overview of the project's context and history. Additionally, there may be concerns about the documentation's length and complexity. Analysts who do not use templates also tend to skip this section in their documentation, as 74% of respondents in this group answered negatively. It can be attributed to the fact that analysts are attempting to document only the essential information, focusing on the project's specific aspects, and may view the Background section as not directly linked to the requirements.

Only 5% of respondents use templates presented in standards such as ISO/IEC/IEEE. Half of the analysts who use standard templates include the Background section, while the other half do not. In contrast, the majority (63%) of those who use self-developed templates include the Background section in their documentation. The lower frequency of utilizing templates from standards and the mixed results regarding the inclusion of the Background section indicate that more work is needed to standardize software documentation templates to ensure that they

include all necessary sections and adequately reflect the field's best practices. Analysts who use self-developed templates are more inclined to include the Background section, implying that they consider it essential for comprehending the project's context and objectives.

The survey data shows 63% of respondents use templates when creating documentation. However, according to [9], in Swedish companies, the proportion is higher at 75%, although it should be noted that the number of respondents in the second study is significantly smaller.

The use of templates also impacts the inclusion of the constraints, dependencies, integration, deployment specifics, functional and non-functional requirements sections because templates provide a standardized and structured approach to documenting a project, making it easier for analysts to ensure that all necessary information is included. The survey results show that 77% of respondents who use templates approved by the company create a separate section for functional requirements. Similarly, 70% of respondents who use their own templates also separate functional requirements. In contrast, respondents who do not use templates or rely on standards highlighted functional requirements as a separate section only in 60% of cases. It underscores the importance of using templates and the need to improve templates presented in standards.

In addition to the template usage, the inclusion of the Background section in the documentation is moderately influenced by two factors: using the documentation as a source for tests (Cramer $V = 0.208$) and as a reminder for further discussions (Cramer $V = 0.234$). Using the documentation for tests highlights the importance of the Background section in providing essential information for effective test planning and execution. Similarly, using the documentation as a reminder for discussions emphasizes the role of the Background section in facilitating communication and collaboration among project stakeholders. The Background section acts as a shared reference point by incorporating relevant background information, promoting understanding and effective communication. These findings underscore the significance of providing adequate context and reference material in software requirements documentation. Recognizing the value

of the Background section in supporting tests and discussions can enhance the quality and effectiveness of the requirements engineering process.

Most of the dependencies were found for the experience factor. It has a statistically significant influence on the separation of 16 out of 21 documentation sections presented in the study – on 6 of which experience has a moderate level of influence, and on ten, it has a weak influence. The experience of the analyst has a moderate impact on such documentation sections as Data models (Cramer's $V = 0,232$), Goals & Objectives (Cramer's $V = 0,222$), Non-functional requirements (Cramer's $V=0,221$), Problem statement (Cramer's $V=0,229$), Risks (Cramer's $V = 0,238$) and Usage scenarios (Cramer's $V = 0,204$). Fig. 4 shows associations between the analyst's experience factor and documentation sections, on which it has a moderate impact.

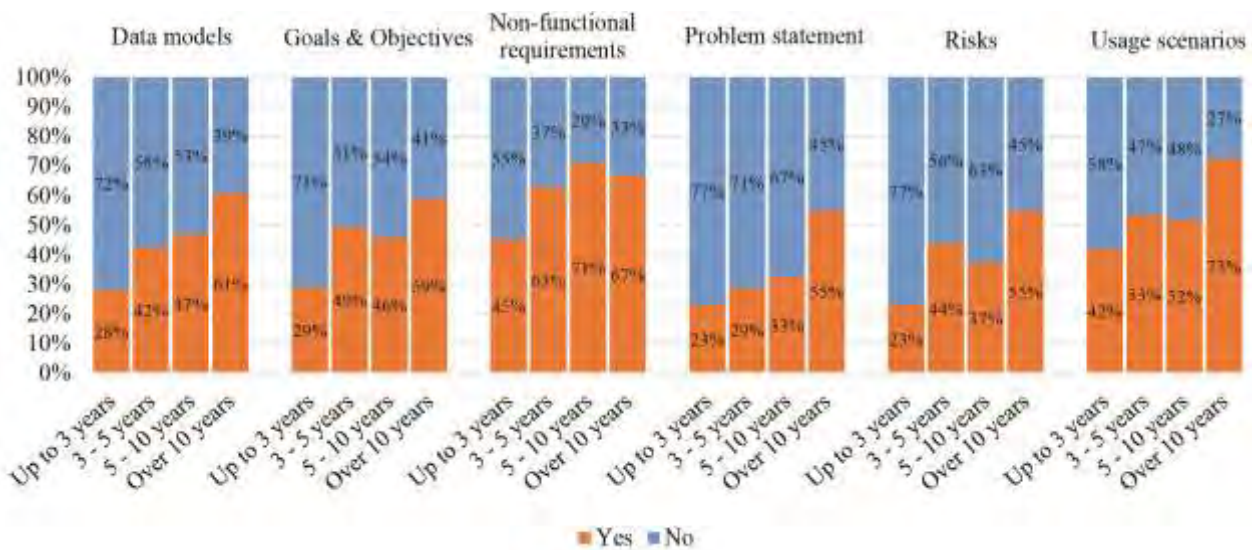


Fig. 4. Impact of business analyst experience on document content

According to Fig. 4, the separation of the mentioned sections in documentation increases with the analyst's experience. Among respondents with over ten years of experience, sections such as Data models, Goals & Objectives, Non-functional requirements, Problem statements, Risks, and Usage scenarios are highlighted on average 30% more often than respondents with less than three years of experience. It can be explained by the fact that experienced analysts gain a deeper understanding of project requirements over time, allowing them to identify better and articulate critical project components. Experience also enables analysts to identify and analyze relationships between different project elements, which can prove invaluable in problem-

solving and project planning. Experienced analysts are exposed to a broader range of project scenarios, and their combination of technical expertise, business acumen, and practical experience enables them to develop an intuitive sense of what is required to achieve successful project outcomes.

Consequently, experienced analysts are able to develop stronger documentation skills, such as the ability to clearly communicate complex ideas, anticipate potential issues, and organize information effectively. These skills enable them to produce more comprehensive and informative documentation, which leads to the inclusion of additional sections. Therefore, fostering a corporate culture that involves experienced analysts

creating company documentation templates and transferring knowledge to less experienced analysts is critical. Using templates and knowledge transfer will lead to better documentation of project requirements and, subsequently, more effective implementation of software development projects.

The data presented in Fig. 4 demonstrate a correlation between analysts' experience and using the Data models section in the documentation. As analysts gain more experience, there is an observed increase in highlighting the Data models section. Specifically, after surpassing the three-year experience threshold, there is a 14% rise in frequency and an additional 14% increase after ten years of experience. These findings indicate that experienced analysts recognize the importance of data modeling and consistently incorporate it into their documentation practices. The research findings (fig. 1) indicate that only 41% of respondents use data modeling. These findings are consistent with a study conducted by Kassab et al. [20]. According to their research, 60% of respondents expressed their requirements using natural language, suggesting an informal approach, while only 33% utilized semi-formal methodologies like UML, class diagrams, and sequence diagrams. In addition, the study shows a significant impact of the absence of data models on the result and overall satisfaction of team members. Among respondents who did not employ any modeling methodology, only 69% felt that the finished product adequately met customers' needs, and a mere 48.5% reported that end users found the finished product easy to use.

In contrast, those who employed a modeling methodology had more positive perceptions, with 87% indicating that customer needs were met and 82% stating that the product was easy to use. These findings strongly suggest that incorporating data modeling into the documentation process positively influences the quality of the final product and customer satisfaction. Semi-formal representations like UML were mainly associated with higher end-user satisfaction levels. Among respondents who utilized semi-formal representations, 86% believed the finished product was easy to use, compared to 59% of those who used informal approaches. Additionally, 90% of respondents using semi-formal representations felt that the finished product's capabilities aligned well with customer or user needs, while the corresponding figure for those using informal methods was 65%. Therefore, including data modeling and using semi-formal representations

in requirements documentation positively impacts the outcome and overall satisfaction of team members and end-users.

The sections Goals & Objectives and Risks demonstrate a similar trend (fig.4). After three years of experience, the inclusion of these sections increases by 20% but experiences a slight decline after five years. The utilization of the Goals & Objectives section decreases by 4%, while the Risks section decreases by 6%. However, after reaching the 10-year experience threshold, analysts observe a resurgence with a subsequent increase of 13% and 18% in utilization. The slight decline in utilizing the Goals & Objectives and Risks sections after five years of experience may be attributed to several factors. One possibility is that as analysts become more experienced, they may focus more on the execution and delivery of projects rather than explicitly documenting goals and risks. Also, it can be influenced by the nature of projects. However, after reaching the 10-year experience threshold, there is a resurgence in utilizing the Goals & Objectives and Risks sections. This resurgence could be attributed to a deeper understanding of the value of explicitly documenting goals and risks, particularly in complex projects or those with higher stakes, which experienced analysts often do. Analysts with extensive experience may recognize that clearly defining goals and effectively managing risks contribute to project success and stakeholder satisfaction.

Among analysts with 5–10 years of experience, there is a slight decrease in the usage of the Usage scenarios section, while analysts with over ten years of experience show a significant increase of 21%. It can be explained by the evolving role of usage scenarios in requirements engineering and the changing needs of stakeholders throughout the project lifecycle. Usage scenarios describe user interactions and ensure the system meets their needs. In the early stages of an analyst's career, the focus is mainly on functional and non-functional requirements, with less emphasis on usage scenarios. However, as analysts gain more experience, they recognize the importance of capturing user interactions and ensuring usability and satisfaction. Experienced analysts proactively include usage scenarios to capture critical workflows, system behavior, and interaction patterns. The significant increase among analysts with over ten years of experience may also be attributed to the growing adoption of user-centered design practices and the recognition of usability and user experience in software development. Analysts with extensive experience have encountered scenarios where

neglecting usage scenarios led to suboptimal system performance or user dissatisfaction. They have witnessed the positive impact of considering usage scenarios, such as improved user acceptance and satisfaction.

Among analysts with over ten years of experience, there is a slight decrease in the usage of the Non-functional requirements section (67%) compared to analysts with 5 to 10 years of experience (71%). It suggests a nuanced trend in considering non-functional requirements. Non-functional requirements specify the quality attributes of a software system, such as performance, reliability, security, and usability. They are crucial in shaping the system's behavior and meeting user expectations. Shift towards agile methodologies, emphasizing collaboration and face-to-face communication, could reduce the reliance on formal documentation, including non-functional requirements. The observed decrease in utilization among experienced analysts can be attributed to their understanding of non-functional requirements, efficient communication channels, and agile methodologies. Nonetheless, alternative approaches should be employed to address non-functional requirements and ensure system quality and stakeholder satisfaction.

Lastly, using the Problem statement section as a separate entity shows a gradual rise (fig. 4). Before reaching the 10-year experience mark, most analysts do not single out this section. However, among analysts with over ten years of experience, there is a notable 22% increase in its usage as a distinct section, causing the number of analysts who emphasize it to surpass those who do not. The increased emphasis on the Problem statement section reflects the maturity and expertise acquired by analysts over time, highlighting their growing ability to accurately identify and address a software project's core challenges and objectives. A well-formulated problem statement should create an awareness of the issue and encourage innovative thinking without prescribing a solution or introducing

biases towards any particular strategy. Emphasizing the problem statement as a distinct section is essential in the long term because it ensures that the team concentrates on the appropriate problem and comprehends the fundamental causes. This approach can help prevent being constantly reactive to issues. Skilled analysts tend to have a more strategic mindset, which accounts for the considerable rise in the use of the Problem statement section in this respondent group.

It should be noted that the level of analyst experience significantly affects only the "Non-functional requirements" section among the top five sections most frequently highlighted separately by analysts (fig. 1). For the "Business requirements," "Functional requirements," and "Glossary" sections, there is a minor impact of experience level, but the trend of highlighting separate sections in the documentation remains consistent, proportional to the respondents' experience level (fig. 5).

According to the survey results, the Non-functional requirements section is the only category the Project Category statistically significantly influences. The relationship between the Project Category and the inclusion of the Non-functional requirements section is depicted in Fig. 6.

Among the four project categories identified in the research, the inclusion frequency of the Non-functional requirements section varies (fig. 6). In development from scratch projects, where software is built from the ground up, the Non-functional requirements section is separate in 69% of cases. This high percentage indicates an early focus on specifying and addressing non-functional aspects such as performance, security, reliability, and usability. For User interface engineering projects involving redesigning an existing system's user interface, the Non-functional requirements section is separate in 61% of cases. It indicates that non-functional aspects are still significantly considered even when the main focus is on the user interface.

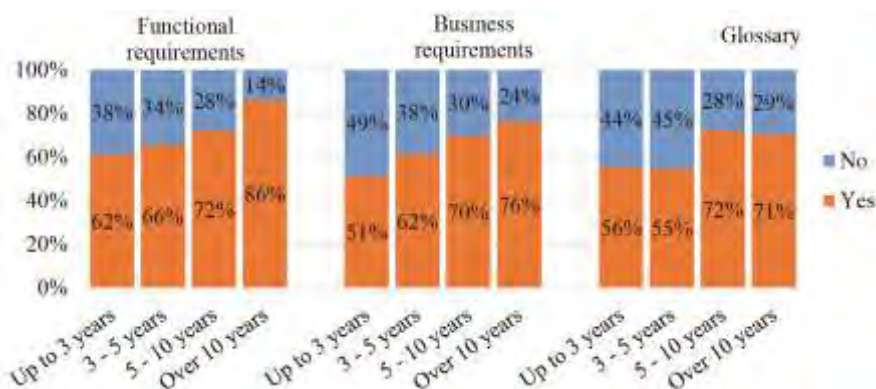


Fig. 5. Impact of business analyst experience on document content (weak association)

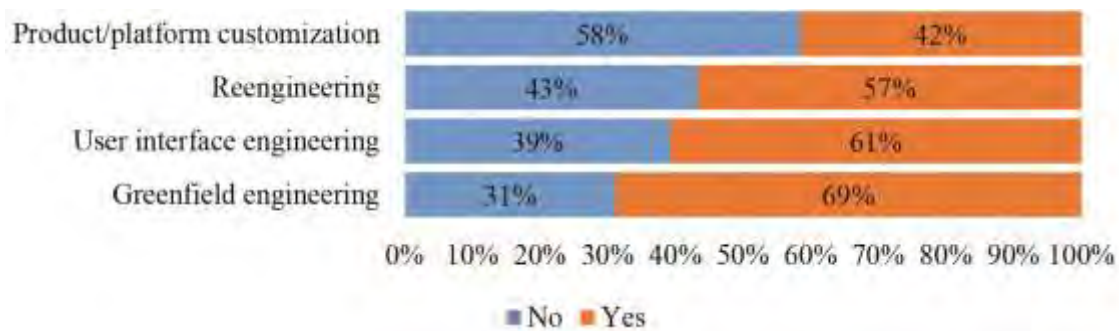


Fig. 6. Project Category associations to the Non-functional requirements section

In Reengineering projects, which involve redesigning and reimplementing an existing system, the Non-functional requirements section is separate in 57% of cases. Although slightly lower than the previous categories, it underscores the importance of addressing non-functional aspects during reengineering. The lower percentage of analysts highlighting the Non-functional requirements section separately in Reengineering projects can be attributed to several reasons. Firstly, the focus is improving existing systems and prioritizing functionality over non-functional aspects. Secondly, working with legacy systems may lead analysts to assume pre-established non-functional requirements. Extensive analysis of the current system's architecture takes precedence over extensive documentation. Time and budget constraints also result in a pragmatic approach, where non-functional requirements may be addressed within functional requirements or communicated informally.

Conversely, in Product/Platform customization projects, the Non-functional requirements section is separate in only 42% of cases, suggesting that non-functional aspects may receive less emphasis in this category. Importantly, in this category, non-functional requirements are often integrated within other documentation sections rather than isolated as separate. The variation in including the Non-functional requirements section across project categories can be attributed to differing priorities, constraints, and contexts associated with each project type. Development from scratch projects may require more careful consideration of non-functional requirements due to their clean slate approach. Conversely, Product/Platform customization projects may rely on pre-existing frameworks or platforms where non-functional requirements are already established and documented implicitly.

No statistically significant influence factors were found for the "User interface" section. It suggests that company type, size, experience level, and other

contextual factors did not significantly impact whether business analysts include a separate "User interface" section in their documentation. The absence of statistically significant influence factors for the "User interface" section indicates that its inclusion is likely determined by other factors not considered in this research study. The decision to include the "User interface" section may be more influenced by project-specific considerations, client requirements, or the expertise and preferences of individual analysts rather than general contextual factors.

Including the Deployment specifics section in software requirements documentation is moderately influenced by utilizing the documentation as a reminder for further discussions. Fig. 7 presents the ratio of analysts who use the documentation for discussions and the percentage of those who include the Deployment specifics section.

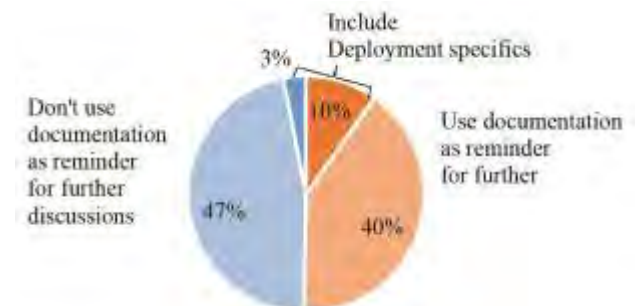


Fig. 7. Associations of usage documentation as a reminder for further discussions in the Deployment specifics section

The ratio shows an equal distribution between analysts who use the documentation as a reminder for further discussions and those who do not (fig. 7). Among those who use the documentation for discussions, the inclusion of the Deployment specifics section is three times more frequent compared to those who do not. It implies that utilizing the documentation for discussions increases the likelihood of including the Deployment

specifics section. Fig. 7 illustrates a relatively low percentage of usage for the Deployment specifics section. This section usually contains pertinent information regarding deployment considerations, such as hardware requirements, installation processes, or system configurations. As previously mentioned, business analysts tend to focus more on requirements related to the design and development phases rather than deployment-specific details. The moderate influence of employing the documentation for discussions suggests that continuous communication and collaboration among project stakeholders encourage the inclusion of the Deployment specifics section.

The inclusion of the Constraints section in software requirements documentation is moderately influenced by the use of documentation in customer acceptance (Cramer's $V = 0.216$). This factor explicitly impacts the Constraints section, indicating that documentation used in customer acceptance affects whether or not the Constraints section is included. Fig. 8 illustrates the association between the use of documentation in customer acceptance and the inclusion of the Constraints section.

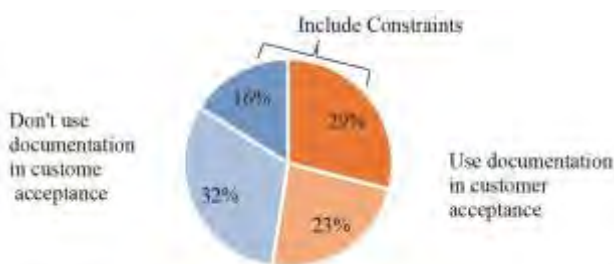


Fig. 8. Associations of usage documentation in customer acceptance to the Constraints section

Fig. 8 shows that the percentage of analysts working on projects where documentation is used in customer acceptance slightly outweighs those working on projects where documentation is not used for this purpose. Moreover, a higher percentage of analysts who use documentation in customer acceptance include the Constraints section in their documentation compared to those who do not. It suggests that utilizing the documentation in customer acceptance increases the likelihood of including the Constraints section. This section in software requirements documentation typically captures any limitations, restrictions, or conditions that need to be considered during the development and implementation of the software. The higher percentage of analysts who include the Constraints section among those who utilize

documentation in customer acceptance indicates the value of involving customers in the requirements process and considering their constraints and acceptance criteria. By using documentation in customer acceptance, analysts can better understand and capture the constraints relevant to meeting customer expectations and ensuring the successful adoption of the software.

Conclusions

A survey study was conducted to analyze the current approaches to creating business analysis documents and the influence of project context on them. A survey with 328 business analysts and requirements engineers from Ukrainian and foreign companies gathered information on current practices in creating business analysis documents. The questionnaire was created based on the NAPIRE initiative and international standards. It included the following business analysis document sections: assumptions, business requirements, constraints, data models, functional requirements, non-functional requirements, and others.

The survey results highlight the importance of functional and business requirements, glossary, and non-functional requirements in software requirements documentation. However, success metrics, deployment specifics, and cost-benefit analysis receive less emphasis, possibly due to challenges in defining metrics and the preference for lean documentation in Agile methodologies.

The influence of the project context on the structure of the business analysis document was identified by using the Chi-square test. The significance of statistical dependencies between the pair "project context – document section" was assessed by Cramer's V effect size measure

Cramer's V statistic indicates that the business sector does not significantly impact specific sections' inclusion in software requirements documentation. Factors like team distribution, organizational maturity, business analyst expertise, and documentation usage play a more influential role. However, the business sector can still influence specific requirements and specifications.

Contextual factors significantly influence the inclusion of the Assumptions section. Out of 14 factors examined, 8 have a statistically significant impact, with 5 having a moderate influence. Factors like company size, team distribution, template usage, and using requirements documentation as a test source moderately

impact the Assumptions section's use. Outstaff and Outsource IT companies prioritize assumptions due to risks in the requirements-gathering process. System integration and dependencies are weakly impacted by company type, suggesting different company types prioritize sections based on their business models and risk considerations. Larger companies emphasize documenting assumptions for a shared understanding of project goals and risks. Smaller companies have a more informal approach to documentation and risk management, resulting in less emphasis on assumptions. Distributed teams use the Assumptions section more frequently due to communication challenges and the need for standardized templates and precise documentation. In large distributed teams, the importance of documenting assumptions may be emphasized during new analyst training. Using requirements documentation as a source for tests encourages documenting assumptions. Templates provide a structured format, increasing the likelihood of including the assumptions section.

Survey data shows that 63% of respondents use templates in their documentation. The use of templates impacts the inclusion of various sections, including Assumptions and Background sections. Templates provide a standardized approach and facilities, including necessary information. However, using templates from standards like ISO/IEC/IEEE is low, indicating a need for improved and standardized templates that include all necessary sections and reflect best practices. Using templates and knowledge transfer improves project requirements documentation and the effective implementation of software development projects.

Analyst experience significantly influences the inclusion of various sections. Experienced analysts more frequently include Data models, Goals & Objectives, Non-functional requirements, Problem statements, Risks, and Usage scenarios. Emphasizing the Problem statement section becomes more prominent among experienced analysts due to their profound understanding of project requirements, ability to identify critical components, and better communication and problem-solving skills. To improve documentation quality, involving experienced analysts in creating templates and transferring knowledge to less experienced analysts is essential.

Among the top five sections in software requirements documentation, the analyst's experience

statistically significant impacts the presence of the Non-functional requirements section. Other sections like Business requirements, Functional requirements, and Glossary are influenced to a lesser extent. The project category also influences the inclusion of the Non-functional requirements section, with higher percentages in Development from scratch and User interface engineering projects.

The presence of the User interface section is not significantly influenced by contextual factors, suggesting project-specific considerations and analyst preferences play a more significant role.

Using documentation as a reminder for discussions increases the likelihood of including the Deployment specifics section.

The use of documentation in customer acceptance affects the inclusion of the Constraints section, highlighting the importance of involving customers and considering their constraints.

Overall, the impact of project context factors on documentation content may vary depending on organizational culture, project complexity, and specific requirements gathering and documentation processes. Improving documentation practices, standardizing templates, and fostering knowledge transfer among analysts can lead to more effective software development projects.

There are several limitations to this study. Despite the fact that the list of sections in business analysis documents for the questionnaire was created on the basis of international standards and codes of knowledge, survey participants could interpret them in different ways. It is important to note that due to the survey's confinement to a single country, the findings cannot be extrapolated to the global software industry without additional study, despite the integration of Ukraine's IT sector into international environments, particularly outsourcing and outstaffing firms, whose employees comprised the majority (65%) of the respondents.

Future research may focus on analyzing the impact of requirements elicitation and requirements documentation techniques on the architecture of business analysis documents, as well as on the methodology for creating document templates, taking into account the context of the project and the standards of the organization.

References

1. *Project Management Institute* (2017), *The PMI Guide to BUSINESS ANALYSIS*. PMI, Newtown Square, Pennsylvania, 488 p.
2. Gobov, D., Yanchuk, V. (2021), "Network Analysis Application to Analyze the Activities and Artifacts in the Core Business Analysis Cycle", *Proceedings of the 2nd International Informatics and Software Engineering Conference (IISEC)*, P. 1–6. DOI: 10.1109/IISEC54230.2021.9672373
3. *International Institute of Business Analysis* (2015), *A guide to the business analysis body of knowledge (BABOK Guide) ver. 3.*, IIBA, Toronto, Ontario, Canada, 514 p.
4. Pohl, K. (2010), "Requirements engineering: fundamentals, principles, and techniques", Springer Publishing Company, 182 p., available at: <https://www.bbau.ac.in/dept/dit/TM/requirementsengi.pdf>
5. ISO/IEC/IEEE 29148. (2011), "Systems and Software Engineering—Life Cycle Processes—Requirements Engineering". ISO/IEC/IEE, Standard 29148:2011. 83 p., available at: <https://www.iso.org/standard/45171.html>
6. Jacobson, I., Booch, G., Rumbaugh, J. (1999), "Unified Software Development Process", Addison-Wesley Professional, 463 p.
7. Gobov, D., Huchenko, I. (2022). "Modern Requirements Documentation Techniques and the Influence of the Project Context: Ukrainian IT Experience", *Advances in Computer Science for Engineering and Education. ICCSEEA 2022. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, Vol. 134. Springer, Cham. P.260-270. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-04812-8_22
8. Rączkowska-Gzowska, K., Walkowiak-Gall, A. (2023), "What Should a Good Software Requirements Specification Include? Results of a Survey", *Foundations of Computing and Decision Sciences*, Vol.48(1), P. 57–81. DOI: <https://doi.org/10.2478/fcds-2023-0004>
9. Franch, X. et al. (2023), "The state-of-practice in requirements specification: an extended interview study at 12 companies", *Requirements Engineering*, 29 April. Vol. 28(3), P. 1–33. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00766-023-00399-7>
10. Wagner, S. et al. (2017), "Requirements Engineering Practice and Problems in Agile Projects: Results from an International Survey", *Proc. XX Ibero-American Conference on Software Engineering (CIBSE)*, Argentina, available at: <https://arxiv.org/list/cs/1703?skip=450&show=2000>
11. Wagner, S. et al. (2019), "Status Quo in Requirements Engineering", *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*, Vol.28 (2), P. 1–48. DOI: <https://doi.org/10.1145/3306607>
12. Abdalazeim, A., Meziane, F. (2021), "A review of the generation of requirements specification in natural language using objects UML models and domain ontology", *Procedia Computer Science*, Vol.189, P. 328–334. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.05.102>
13. Medeiros, J. et al. (2017), "An approach based on design practices to specify requirements in agile projects", *Proceedings of the Symposium on Applied Computing (SAC 17)*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, P. 1114–1121. DOI: <https://doi.org/10.1145/3019612.3019753>
14. Heck, P., Zaidman, A. (2016), "A systematic literature review on quality criteria for agile requirements specifications", *Software Quality Journal*, Vol. 26 (1), P. 127–160. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11219-016-9336-4>
15. Jarzębowicz, A., Połocka, K., (2017) "Selecting requirements documentation techniques for software projects: a survey study", *Proceedings of Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS, 2017)*, IEEE, P. 1189–1198. DOI: <https://doi.org/10.15439/2017F387>
16. Gobov, D. (2023), "Practical Study on Software Requirements Specification and Modelling Techniques", *International Journal of Computing*, P. 78–86. DOI: <https://doi.org/10.47839/ijc.22.1.2882>
17. Beedle, M. et al. "Manifesto for Agile Software Development", available at: <https://agilemanifesto.org/> (last accessed: 11 May 2023)
18. Al-Msie'deen, R., Blasi, A., Alsuwaiket, M. (2021), "Constructing a software requirements specification and design for electronic IT news magazine system", *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, Vol. 8(11), P. 104–118. DOI: <https://doi.org/10.21833/ijaas.2021.11.014>
19. Gobov, D. (2022), "Dependencies between requirements elicitation techniques: a survey study in Ukrainian companies", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, Vol. 3 (21), P. 5–15. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.21.005>

20. Kassab, M., Neill, C., Laplante, P. (2014), "State of practice in requirements engineering: contemporary data", *Innovations in Systems and Software Engineering*, 10, P. 235–241. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11334-014-0232-4>

Received 16.05.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Гобов Денис Андрійович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", доцент кафедри інформатики та програмної інженерії факультету інформатики та обчислювальної техніки, Київ, Україна; e-mail: d.gobov@kpi.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9964-0339>

Зусва Олександра Валеріївна – кандидат економічних наук, аналітик-консультант CS Ltd., Харків, Україна; e-mail: olekszueva@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-9661-9657>

Gobov Denys – PhD (Engineering Sciences), National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Senior Lecturer at the Department of Computer Science and Software Engineering of the Faculty of Informatics and Computer Science, Kyiv, Ukraine.

Zuieva Oleksandra – PhD (Economic Sciences), Analytics Consultant at CS Ltd., Kharkiv, Ukraine.

ВИЯВЛЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ

МІЖ КОНТЕКСТОМ ІТ-ПРОЄКТУ ТА ЗМІСТОМ ДОКУМЕНТІВ БІЗНЕС-АНАЛІЗУ

Предметом статті є практики документування вимог до програмного забезпечення в ІТ-проєктах. **Мета** роботи полягає в тому, щоб визначити, яка інформація міститься в результатах бізнес-аналізу та як контекст проєкту впливає на зміст документів бізнес-аналізу. У статті сформульовані такі **завдання**: вивчити промислові стандарти й досвід бізнес-аналітиків та інженерів у специфікації та моделюванні вимог; створити та провести опитування щодо практик документування вимог стосовно програмного забезпечення в ІТ-проєктах; з'ясувати уподобання фахівців-практиків із бізнес-аналізу щодо змісту документів; визначити, як контекст проєкту впливає на зміст документів. Застосовано такі **методи**: 324 фахівці українських компаній опитано щодо їхніх уподобань у процесі створення документів бізнес-аналізу, а також їхнього досвіду та атрибутів профілю проєкту, у якому ці техніки використовуються. Для визначення статистично значущих залежностей між контекстом проєкту та змістом документів бізнес-аналізу було застосовано тест χ^2 -квадрат незалежності та показник розміру ефекту V. Крамера. Здобуто такі **результати**: визначено перелік найбільш часто використовуваних елементів у документах бізнес-аналізу. На основі p -значення тесту χ^2 -квадрат знайдено 78 статистично значущих зв'язків для пар "контекст проєкту – зміст документа бізнес-аналізу", для 80 з них значущість виявлених залежностей підтверджено за допомогою розміру ефекту V. Крамера. **Висновки**. Обґрунтовано, що контекст проєкту впливає на зміст документів бізнес-аналізу в ІТ-проєктах. Найбільш впливовими факторами є досвід бізнес-аналітика, розподіл команди, розмір і тип компанії, використання шаблонів і мета використання бізнес-аналітичних документів. Знайдені залежності можуть керувати вибором структури документа бізнес-аналізу та розробленням специфічних для проєкту шаблонів у процесі створення підходу до бізнес-аналізу й підходу до управління інформацією з бізнес-аналізу.

Ключові слова: документ бізнес-аналізу; інженерія вимог; контекст проєкту; V. Крамера; емпіричне дослідження.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Гобов Д. А., Зусва О. В. Виявлення залежностей між контекстом ІТ-проєкту та змістом документів бізнес-аналізу. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 2 (24). С. 39–53. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.039>

Gobov D., Zuieva O. (2023), "Identifying the dependencies between IT project context and business analysis document content", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (24), P. 39–53. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.039>

N. HULIIEV, M. PERETIAHA, A. KHOVRAT, D. TESLENKO, A. NAZAROV

STUDY OF PREDICTION AND CLASSIFICATION MODELS IN THE PROBLEMS OF DIABETES AMONG PATIENTS WITH A STROKE IN DIFFERENT LIVING CONDITIONS

The subject of the study in the article is the methods of predicting the development of diabetes. Diabetes mellitus is a non-communicable disease that has affected 425 million people, and by 2045 the number will only increase by 1.5 times. It has been proven to be an independent contributing factor to stroke development. When there is too much sugar in the blood, it negatively affects the arteries and blood vessels. People with this disease are more likely to develop atherosclerotic plaques and blood clots, which can lead to heart blockage and ischemic stroke. Having diabetes increases the risk and worsens the course of a stroke. According to the Framingham Study, the number of recurrent cases doubles. **The aim of the study** is to investigate methods of predicting and classifying the development of diabetes among people, in particular stroke patients, to prevent the development of other diseases. The complexity of the problem lies in the fact that there are as many undiagnosed cases as diagnosed ones, so about half of people suffer from the disease and the resulting complications due to improper or delayed diagnosis. Therefore, timely diagnosis of a disease that is difficult to detect is important in order to prevent the development of further complications. **The article solves the problem** of a multi-criteria task of choosing the best algorithm for predicting the occurrence of a disease. **The following methods are used in this paper:** multilayer perceptron, k-nearest neighbors method, decision tree, and logistic regression. Nowadays, machine learning has begun to apply to similar problems. In the 1950s and 1960s, there were attempts to combine the approaches to creating neural networks that existed at the time, which made it possible to calculate quantitative descriptions of human intelligence, and memorize, analyze, and process information, which resembled the work of the human brain. Medicine is one of the main areas of human activity where various classifier and neural network algorithms are gaining popularity yearly. They are trendy in disease diagnostics. **Results:** the initial conditions for choosing the best model are met by logistic regression. **Conclusions:** as a result of the study, the optimal model for predicting the development of the disease was selected.

Keywords: multilayer perceptron; neural network; prediction; stroke; diabetes mellitus.

Introduction

Diabetes mellitus (DM) is one of the most common diseases of the endocrine system. Today, diabetes is considered a pandemic, as the number of patients worldwide is increasing by 5–7% annually. It is predicted that by 2030 there may be approximately 360 million people with diabetes, and by 2040 the number will double to 640 million.

Diabetes mellitus is a metabolic group of diseases characterized by impaired insulin secretion and action, as well as hyperglycemia.

According to the 1999 classification, revised and improved in 2019, diabetes has the following types:

- type I – occurs as a result of the destruction of pancreatic β -cells during an autoimmune or undetermined process that causes insulin deficiency;
- type II – the most common type, which develops in case of impaired insulin secretion due to insulin resistance;
- hybrid forms of DM;
- gestational DM;
- DM of known etiology;
- unclassified DM.

The World Health Organization defines DM as a non-communicable disease that is one of the ten possible causes of death, as life expectancy in diabetics is reduced by 25%. Almost 80% of deaths are caused by cardiovascular complications, namely heart attack or stroke, which also lead to disability.

A stroke causes damage to the blood vessels in the brain because they are blocked by a blood clot or rupture, and therefore cannot carry oxygen and nutrients.

Causes of stroke:

- high blood pressure;
- high cholesterol;
- abnormal heart rhythm;
- overweight;
- diabetes mellitus;
- excessive stress.

Analysis of the problem and existing methods

Canadian experts conducted a study: they collected data on 12,200 patients over 30 diagnosed with type II diabetes. Of these, 9.1% were diagnosed with various

types of strokes within five years. Studies have shown that long-term diabetes leads to macrovascular problems.

It is known that stroke due to diabetes is diagnosed in people under the age of 40 3–4 times more often, and after 40 years – 1.5–2 times more often than in nondiabetics. Mostly, ischemic variants occur (in 65% of cases, the atherothrombotic subtype), and mortality is 40.3–59.3%. Also, the likelihood of strokes increases due to high blood pressure, which can be accompanied by cerebrovascular syndrome, impaired consciousness, and pneumonia. Thus, the brain is affected, and neurological deficits slowly begin, but the lost functions are not fully restored. It is worth noting that in 46% of cases there are signs of leukoaraiosis in the periventricular zone, which shows the extent of cerebral vascular damage.

More than 80% of people with stroke in the setting of diabetes mellitus may have movement disorders.

To date, the causes of stroke caused by diabetes mellitus have not been fully identified. Researchers believe that in this case, stroke is a clinical syndrome of macroangiopathy caused by a disorder of carbohydrate metabolism.

Machine learning is now being used to solve such problems. In the 1950s and 1960s, there were attempts to combine the approaches to creating neural networks available at the time. They enabled computational capabilities that quantitatively described the features of human intelligence, memorization, analysis, and processing of information that resembled the work of the human brain.

In the modern world, many problems faced by specialists in various fields are solved with the help of machine learning, as there is a need to process a significant amount of information. As you know, there are countless medical records for each disease, so the question arises: "How to correctly predict the possible development of a disease?" The article [1] describes *Big Data* as a set of organized and unorganized data for which conventional methods are not effective, so in this case, machine learning is used as a way to find unnoticeable connections among a large number of queries. This method involves the stages of collecting and preparing information, selecting and training a model that can solve the problem of a particular industry. At the same time, the authors of the article emphasize that the use of machine learning in this case does not require deep knowledge and full immersion in the subject area, which also simplifies the solution of tasks when processing a significant amount of information.

It is worth noting that the first step is to define the criteria for choosing a model. The article [2] describes the construction of the principles of choosing the best model for decision-making, in particular, for hiring. The authors present indicators that provide useful information for a more *accurate* assessment of the algorithm's effectiveness. In the process of developing classification algorithms, the authors calculate the *accuracy*, *precision*, *recall*, and *f*-measure criteria for each. The authors argue that *accuracy* should be used when the number of positive and negative examples is approximately equal; *precision* calculates the severity of possible consequences in case a negative example is identified as positive; *recall* is appropriate when there is no positive data; and the *f*-measure is effective when the records of one class significantly exceed the data of another. Thus, the study decided to apply the following criteria.

It is well known that many neural network models are used in medicine. Article [3] discusses the construction, analysis, and development of neural networks used to predict the development of endocrine disease. First of all, we are talking about the Kohonen neural network, multilayer perceptron, hybrid neural network, adaptive resonance theory models and its modified model – *Fuzzy-ART*. To choose the most optimal model, the following indicators are taken into account: neural network speed, reliability of results, amount of memory required, training method, and application principles. The best of these neural networks is the multilayer perceptron, which will be discussed in this paper.

Thus, the basis for the use of neural networks in medicine is the construction of a multilayer perceptron. The variable accuracy of the neural network for diagnosing cardiovascular diseases ranged from 64% to 94%. These were models of a multilayer perceptron with two hidden layers with an accuracy of over 90%. Their training was based on genetic algorithms.

The above proves that stroke and diabetes are dangerous not only because of their consequences, but also because they can lead to other serious diseases. Therefore, **the aim of the article** is to investigate methods of predicting the development of diabetes among stroke patients under different conditions of life and to choose the most optimal model for this task.

To select a model among a set of alternatives with different characteristics, a multi-criteria problem of choosing the best option is used.

Solving such problems can be difficult due to the ambiguity of the choice. In such cases, methods from two groups are used: the first is designed to reduce the number of evaluation criteria, in which case assumptions are made to rank the values of characteristics and compare all options; the second group of methods is aimed at removing bad alternatives before the comparison algorithm begins.

For our study, the preferred method is the first group's method – collapsing – a method in which all criteria of alternatives become one common one. The most commonly used methods are additive, multiplicative, and maximin collapsing.

Additive collapsing is presented as follows:

$$K(x) = \sum_{j=1}^n a_j K_j(x), \quad (1)$$

where $K(x)$ – general criterion for the alternative $x \in X$;

$(K_1(x), \dots, K_j(x), \dots, K_n(x))$ – a set of initial criteria;

n – a number that describes its number;

a_j – normalization factor, weight of the alternative's characteristic feature.

The best alternative is calculated as follows:

$$x^* = \arg \max_{x \in X} K(x). \quad (2)$$

That is, the solution is the largest value calculated by convolution.

The best solutions of multiplicative and maximal convolution are also calculated using formula (2).

We have to choose the right method for the study. We cannot immediately reject all possible alternatives, so the methods of the second group are not suitable.

Let's choose additive convolution, because multiplicative convolution requires normalization of values from 0 to 1, whereby in the case of 0 we will have 0, despite other priorities of the criteria. First, it is necessary to determine the criteria by which all proposed alternatives will be evaluated, and then weights are calculated for each of them, i.e., the most important and effective alternative in decision-making. All criteria are distinguished by their indicators – qualitative and quantitative. This method works with the latter, so if you have the former, you need to replace them with the appropriate values of the latter type.

Once the quantitative indicators are ready, some of the alternatives can be eliminated using the Pareto principle if there are those that are worse than others in all criteria, and then normalization is necessary.

The scores for the criteria differ in the scales of their values, i.e., mass is measured in kilograms, speed in meters per second or in seconds, so for a correct assessment of the values, they need to be normalized in the range from 0 to 1. Usually, the higher the value, the better, but it can also be the other way around, depending on the task at hand.

The next step is to determine the weighting factors for ranking the criteria. A weighting factor is a multiplier that determines the importance of how much a particular criterion can affect the final choice [4].

It remains to calculate the convolution value for all alternatives, and then compare: determine for each alternative the sum of the products of all the values of the criteria and their weighting factors. We will conduct an experiment to select the most optimal model for the task at hand, but first we will describe each of the possible options.

Let's consider the practical part of building forecasting and classification models. We will describe experiments for selected algorithms:

- multilayer perceptron;
- classification tree;
- k -nearest neighbors method;
- logistic regression.

Let's download two datasets from the website <https://www.kaggle.com/datasets/alexteboul/diabetes-health-indicators-dataset>. Each of them is a response to a telephone survey on health topics conducted annually by the U.S. Center for Disease Control and Prevention (CDC). This Behavioral Risk Factor Surveillance System (BRFSS) collects responses from more than 400,000 Americans about unhealthy behaviors, chronic diseases, and use of preventive services. The surveys have been conducted since 1984, and the results for 2015 are available on *Kaggle* in a csv file format. The dataset contains 253,680 records [5–7].

The next step is to train the model. To do this, we divide the data for each forecasting method in the following ratio: 80% – training sample, and 20% – test sample.

The perceptron will have three layers. The first one contains the same number of neurons and independent attribute variables. The hidden layer will have two neurons for further processing. The final layer will have one neuron and will produce the final value of the object's probable belonging to one of the possible classes: if it is greater than a certain threshold, the prediction will produce 1, if less than 0.

Suppose we have the following initial conditions for the first data set:

- threshold of values – 0.5;
- number of epochs – 100;
- training sample – 200.000;
- testing sample – 50.000.

The algorithm proceeds as follows:

- 1) the model receives another object as input;
- 2) the first layer is filled with the values of its attributes;
- 3) calculate weighted sums for each of the two layers of the hidden layer;
- 4) calculate sigmoidal activation values for each of the following neurons;
- 5) repeat the same operations for the neurons of the hidden layer that are further included in the resulting neuron;
- 6) adjust the weights.

Repeat the algorithm and calculate the global error using the gradient descent method until it becomes minimal or until we reach the maximum number of training epochs.

Let's build a classification tree. Consider the algorithm for the first data set. Initially, we have the following conditions:

- training sample – 200.000;
- testing sample – 50.000.

The basis of the algorithm is the *Gini Impurity* of the tree, an indicator calculated as the minimum value of all possible *Gini Impurity* attributes of an object. It reflects the extent to which an attribute can distinguish data by the value of the main dependent feature, and the lower its value, the fewer errors it can cause. If the values of the attribute are not binary, all its possible values are taken into account, sorted, and for each two values, their average number and *Gini Impurity* are calculated.

After selecting the appropriate attribute, the root is built from this key, the left branch containing information with a positive value for a particular attribute is added, and the right branch with a negative value. Then the branch with the larger amount of information is selected as the root.

The algorithm terminates when the tree contains all possible attributes or the branch becomes a leaf, i.e. contains data from one of the possible classes.

Initial conditions:

- training sample – 25.000;
- test sample – 30.000;
- number of nearest neighbors – 3.

This classifier works in the following way: the more neighbors of a certain class, the more likely it is that the object belongs to this class as well. The number k here is the number of neighbors that are closer to the next element than others. The distance in this algorithm is calculated using the Euclidean criterion. The method does not require training, so it is immediately applied to the test set items among the training set records. Therefore, it loads the system by calculating the distances from each element of the test set to all its neighbors in the training set on a large scale.

Let's conduct an experiment for the first dataset using logistic regression, the main purpose of which is to divide objects into two classes.

At the beginning we have:

- number of stages – 100;
- training sample – 200.000;
- testing sample – 50.000.

The algorithm is as follows:

- initialization of synaptic connections and offsets;
- calculation of a linear combination of input features;
- calculating the probable value using a sigmoid function;
- determination of the loss function (log loss);
- adjusting weight relationships and offsets using gradient descent.

The algorithm terminates when the loss function has reached the desired value or the maximum number of training stages has been reached.

The experiment was conducted for the first dataset with the initial conditions specified above. Now let's calculate the quality of the implemented algorithms based on the calculated metric values.

Let's simulate and solve the vector optimization problem. We need to choose the best possible model with a high percentage of reliable results. Let's prepare the decision-making process for choosing the right algorithm [8–9].

1) Let us describe the set of alternatives:

- multilayer perceptron (MLP) [10];
- logistic regression;
- decision tree;
- k -nearest neighbors method.

2) Let's describe the selection criteria:

- *precision* – the number of objects that, according to the algorithm, belong to a positive class, which is a true statement;
- *accuracy* – the number of correctly predicted results;

- *recall* – the number of positively identified items from the entire scope of this class;
- *f*-measure is a quality criterion that combines accuracy and recall.

3) Let's describe the scoring scales by criteria:

- all indicators have values between 0 and 1.

We present the model of the task in the form of a table with known indicators (Table 1).

Table 1. Output indicators

	Multilayer perceptron	Classification tree	k-nearest neighbors	Logistic regression
Accuracy	84.854	82.8	99.78	85.5575
Precision	1	0.845	0.9974	0.8683
Recall	0.84854	1	1	0.978
F-measure	0.91	0.9162	0.9987	0.92

For an accurate assessment, the indicators should be in the same range, so let's normalize the data: divide the

accuracy value by the reference value of 100 and we will have normalized indicators (Table 2).

Table 2. Table with normalized indicators

	Multilayer perceptron	Classification tree	k-nearest neighbors	Logistic regression
Accuracy	0.84854	0.828	0.9978	0.855575
Precision	1	0.845	0.9974	0.8683
Recall	0.84854	1	1	0.978
F-measure	0.91	0.9162	0.9987	0.92

At this stage, the networks are not compared according to the Pareto principle, so we will perform linear additive convolution with normalizing factors for the entire problem model and consider the results of the study (Table 3).

As we can see, under the condition of linear additive convolution, the k-nearest neighbors algorithm is better at predicting whether objects belong to a certain

class. However, we should note that the study was not conducted for the entire sample, but for a part of the information due to the long operation of the method. This alternative is suitable for a small amount of data, so logistic regression is a better option for processing a significant amount of information. If we repeat the calculations for the second dataset (Table 4), the result will be the same.

Table 3. Linear additive convolution

	Normalization multiplier	Classification tree	k-nearest neighbors	Logistic regression	Classification tree
Accuracy	0.2832929	0.84854	0.828	0.9978	0.855575
Precision	0.2694909	1	0.845	0.9974	0.8683
Recall	0.2613327	0.84854	1	1	0.978
F-measure	0.2670298	0.91	0.9162	0.9987	0.92
		0.97462471	0.96827181	1.079475332	0.977628

Table 4. Indicators of the second dataset study

	Multilayer perceptron	Classification tree	k-nearest neighbors	Logistic regression
Accuracy	86.482	82.8	99.68	86.925
Precision	0.86482	0.8419	0.9967	0.8796
Recall	1	1	0.9995	0.9833
F-measure	0.9275	0.9141	0.9833	0.9286

Thus, as the study confirmed, regression analysis is the best method for predicting the development of diabetes among people.

Conclusions

Machine learning models are the key to new opportunities in various fields. In particular, this applies to medicine, where machine learning is used to diagnose and predict the occurrence of possible diseases [11–14].

To date, many studies have been conducted on an important problem of humanity – identifying the cause of disease development. Various models are used for this purpose: neural networks, classifiers, decision trees, etc.

This paper investigates the most common prediction and classification models used in the medical field, namely the multilayer perceptron, decision tree, k -nearest neighbors method, and logistic regression. Each of them was analyzed on the basis of the *accuracy*, *precision*, *recall*, and *f*-measure criteria. Linear additive convolution was used to determine the best of these methods – k -nearest neighbors. However, given that this model functions slowly when working with a large amount of information, logistic regression was found to be the best model for predicting the development of diabetes.

The main advantages of the chosen model in medicine are:

- the ability to search for relationships in very complex situations when they are difficult to notice when assessing the situation;
- due to the ability to learn, the model can find solutions to problems even in the absence of a priori knowledge of the initial information, the development of the phenomenon under study, the dependence between parameters, input indicators and expected results;
- the accuracy of forecasts does not depend on the availability of different types of less informative or missing data.

However, despite the effectiveness of machine learning models, they have several drawbacks:

- training takes some time, the neural network has to go through retraining stages during repeated use, and a large amount of input information requires more time;
- the reliability of the results could be better [15].

Logistic regression meets all the requirements set out in this paper, but its efficiency needs to be improved.

Therefore, further research will be aimed at optimizing the chosen model. As of today, it has drawbacks that need to be eliminated.

Logistic regression uses first-order optimization methods, namely the gradient descent method. Its essence lies in the fact that synaptic weights change iteratively in the direct or opposite direction of the target gradient function. The update of values reflecting how the attributes of the elements affect the dependent feature continues until the most optimal results are achieved. The speed of this process, namely the number of iterations, depends on the value of the training parameter.

The gradient descent method is easy to implement when developing models in machine learning, but it has several drawbacks.

The first one is that in the case of a large amount of information, the algorithm is complicated by long redundant calculations. This is when stochastic gradient descent (SGD) comes in handy. This method uses a randomly selected sample to adjust the gradient during each iteration without calculating its exact value, which is what the method estimates. The number of data records does not affect the performance of the algorithm, and it is capable of achieving sublinear convergence speed. Therefore, stochastic gradient descent spends less time updating model parameters and does not accept large-scale calculations.

The second problem is to determine the optimal model training parameter, or more precisely, the hyperparameter. The process of model creation, speed, and accuracy of results depend on the hyperparameter. In choosing the best value that can be used in machine learning, various methods are used that return a tuple of hyperparameters and losses, namely:

- lattice search;
- random search;
- Bayesian optimization;
- optimization based on gradients;
- evolutionary optimization;
- population-based optimization.

The study used the method of tuning hyperparameters by random search. Therefore, in the future, it can be removed from the options for modifying and optimizing the implemented algorithm.

Thus, the purpose of further research is to optimize the model, eliminate shortcomings in its functioning in order to accurately determine the possibility of developing diseases.

References

1. Sharonova, N., Kyrychenko, I., Tereshchenko, G. (2021), "Application of big data methods in E-learning systems", *Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2021): 5th International Conference, Lviv, 22–23 April 2021: CEUR workshop proceedings*, No. 2870, P. 1302–1311.
2. Smelyakov K., Hurova Y., Osiiivskyi S. (2023), "Analysis of the Effectiveness of Using Machine Learning Algorithms to Make Hiring Decisions", *Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2023): 7th International Conference, Kharkiv, 20–21 April 2023: CEUR workshop proceedings*, No. 3387, P. 77–92.
3. Kyrychenko I., Nazarov O., Huliiev N., Avdieiev O. (2023), "Selection of Artificial Neural Networks for Disease Prediction", *Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2023): 7th International Conference, Kharkiv, 20–21 April 2023: CEUR workshop proceedings*, No. 3387, P. 236–248.
4. Haglin, J. M., Jimenez, G., Eltorai A. (2019), "Artificial neural networks in medicine", *Health and Technology*, No. 9, P. 1–6. DOI: 10.1007/s12553-018-0244-4.
5. Gaur, L., Bhatia, U., Jhanjhi, N. Z., Muhammad, G. (2023), "Medical image-based detection of COVID-19 using Deep Convolution Neural Networks", *Multimedia Systems*, No. 29, P. 1729–1738. DOI: 10.1007/s00530-021-00794-6
6. IHME (2022), *11 global health issues to watch in 2023, according to IHME experts*, available at: <https://www.healthdata.org/acting-data/11-global-health-issues-watch-2023-according-ihme-experts> (last accessed 18.05.2023).
7. Nuha, A., et al. (2022), "Introduction and Methodology: Standards of Care in Diabetes–2023", *Diabetes Care*, No. 46 (1), P. 1–4. DOI: 10.2337/dc23-Sint
8. Khan, G., Siddiqi, A., Ghani Khan, M. U., Qayyum Wahla, S., Samyan, S. (2019), "Geometric positions and optical flowbased emotion detection using MLP and reduced dimensions", *IET Image Processing*, No. 13 (4), P. 634–643. DOI: 10.1049/iet-ipr.2018.5728
9. Verma, S., Razzaque, M. A., Sangtongdee, U., Arpnikanondt, C., Tassaneetrithep, B., Hossain, A. (2021), "Digital Diagnosis of Hand, Foot, and Mouth Disease Using Hybrid Deep Neural Networks", *IEEE Access*, No. 9, P. 143481–143494. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3120199
10. Rimi, T. A., Sultana, N., Ahmed Foysal, M. F. (2020), "Derm-NN: Skin Diseases Detection Using Convolutional Neural Network", *4th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*, Madurai, India, P. 1205–1209. DOI: 10.1109/ICICCS48265.2020.9120925
11. Sarvamangala, D. R., Kulkarni, R. V. (2022), "Convolutional neural networks in medical image understanding: a survey", *Evolutionary Intelligence*, No. 15, P. 1–22. DOI: 10.1007/s12065-020-00540-3
12. Liu, Y., Jain, A., Eng, C. et al. (2020), "A deep learning system for differential diagnosis of skin diseases", *Nature Medicine*, No. 26 (6), P. 900–908. DOI: 10.1038/s41591-020-0842-3
13. NIDDKD (2022), *Diabetes Prevention Program (DPP)*, available at: <https://www.niddk.nih.gov/about-niddk/research-areas/diabetes/diabetes-prevention-program-dpp> (last accessed 18.05.2023).
14. Tison, G. H., Zhang, J., Delling, F. N., Deo, R. C. (2020), "Automated and Interpretable Patient ECG Profiles for Disease Detection, Tracking, and Discovery". *Circulation: Cardiovascular Quality and Outcomes*. No. 12 (9). DOI: 10.1161/circoutcomes.118.005289
15. Smelyakov, K., A., Chupryna, Bohomolov, O., Ruban, I. (2020), "The Neural Network Technologies Effectiveness for Face Detection", *3rs International International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP)*, Lviv, Ukraine, P. 201–205. DOI: 10.1109/DSMP47368.2020.9204049

Received 15.06.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Гулієв Нурал Бахадур огли – Харківський національний університет радіоелектроніки, магістр зі спеціальності "Інженерія програмного забезпечення", Харків, Україна; e-mail: nural.huliiev@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2123-0377>

Перетяга Максим Юрійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, магістр зі спеціальності "Інженерія програмного забезпечення", Харків, Україна; e-mail: maksym.peretiaha@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9675-1305>

Ховрат Артем Вячеславович – Харківський національний університет радіоелектроніки, магістр зі спеціальності "Інженерія програмного забезпечення", Харків, Україна; e-mail: artem.khovrat@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1753-8929>

Тесленко Денис Максимович – Харківський національний університет радіоелектроніки, магістр зі спеціальності "Інженерія програмного забезпечення", Харків, Україна; e-mail: denys.teslenko@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6289-1633>

Назаров Олексій Сергійович – кандидат технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри програмної інженерії, заступник декана факультету "Комп'ютерні науки", Харків, Україна; e-mail: oleksii.nazarov1@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8682-5000>

Huliiev Nural – Kharkiv National University of Radio Electronics, M. Sc. in Software Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Peretiaha Maksym – Kharkiv National University of Radio Electronics, M. Sc. in Software Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Khovrat Artem – Kharkiv National University of Radio Electronics, M. Sc. in Software Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Teslenko Denys – Kharkiv National University of Radio Electronics, M. Sc. in Software Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Nazarov Alexei – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor at the Department of Software Engineering, Kharkiv, Ukraine.

ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ В ЗАДАЧАХ НАЯВНОСТІ ДІАБЕТУ СЕРЕД ПАЦІЄНТІВ З ІНСУЛЬТОМ У РІЗНИХ УМОВАХ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

Предметом дослідження є методи прогнозування розвитку цукрового діабету. Цукровий діабет – неінфекційне захворювання, що вразило 425 млн людей, а до 2045 р. їхня кількість збільшиться в півтора рази. Доведено, що це захворювання є незалежним фактором, що спричиняє розвиток інсульту. Коли в крові занадто багато цукру, він негативно впливає на артерії та судини. Пацієнти з діабетом більш схильні до утворення атеросклеротичних бляшок і тромбів, що може призвести до блокади серця та ішемічного інсульту. Наявність діабету збільшує ризик інсульту й погіршує його перебіг. За результатами Фремінгемського дослідження, кількість повторних випадків захворювання серця подвоюється. **Мета дослідження** – вивчити методи прогнозування та класифікації розвитку діабету серед людей, зокрема пацієнтів з інсультом, для запобігання іншим захворюванням. Складність проблеми полягає в тому, що не діагностованих випадків стільки ж, скільки й діагностованих, тому близько половини людей страждають від хвороби й спричинених ускладнень через неналежне або запізнє діагностування. Тому важлива вчасна діагностика захворювання, яке важко виявити, з метою запобігання розвитку подальших ускладнень. **Завданням статті** є вибір найкращого алгоритму прогнозування виникнення захворювання. У роботі використано такі **методи**: багатопаровий перцептрон, метод k -найближчих сусідів, дерево рішень і логістична регресія. На сьогодні для вирішення подібних проблем широко застосовується машинне навчання. Упродовж 1950–1960-х рр. були спроби об'єднати наявні на той час підходи до створення нейронних мереж, що дало змогу обчислювати кількісні описи людського інтелекту, а також запам'ятовувати, аналізувати та обробляти інформацію, що нагадувало роботу людського мозку. Медицина – одна з основних галузей, де різноманітні класифікатори та нейромережні алгоритми з кожним роком набувають все більшої популярності. Вони є пріоритетними, зокрема, і в діагностиці захворювань. **Результати**: з'ясовано, що початковим умовам вибору найкращої моделі відповідає логістична регресія. **Висновки**: унаслідок дослідження обрано оптимальну модель для прогнозування розвитку захворювання.

Ключові слова: багатопаровий перцептрон; нейронна мережа; прогнозування; інсульт; цукровий діабет.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Гулієв Н. Б. огли, Перетяга М. Ю., Ховрат А. В., Тесленко Д. М., Назаров О. С. Дослідження моделей прогнозування та класифікації в задачах наявності діабету серед пацієнтів з інсультом у різних умовах життєдіяльності. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 2 (24). С. 54–61. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.054>

Huliiev, N., Peretiaha, M., Khovrat, A., Teslenko, D., Nazarov, A. (2023), "Study of prediction and classification models in the problems of diabetes among patients with a stroke in different conditions of living conditions", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (24), P. 54–61. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.054>

О. КАРАТАЄВ, І. ШУБІН

ПРОБЛЕМИ ПОВТОРНОГО ВИКОРИСТАННЯ ЗНАТЬ У ПРОЦЕСІ ПРОЄКТУВАННЯ ПРОГРАМНИХ СИСТЕМ

Останнім часом значна увага приділяється створенню баз знань, що містять мільйони фактів про різні об'єкти реального світу. Одним із ключових аспектів управління знаннями є повторне використання знань, які були набуті раніше. **Предмет дослідження** – процеси повторного використання знань і створення програмних систем на основі баз знань. Інтерпретація знань є одним із підходів до повторного їх застосування, що полягає у виведенні нових знань на основі наявних фактів у базі знань. **Метою** дослідження є підвищення ефективності повторного використання знань в програмних системах на основі баз знань способом автоматичного видобування правил. Для досягнення поставленої мети виконано такі **завдання**: досліджено підходи до структурування наявних у базі даних фактів; проведено якісний аналіз можливості застосування автоматичних методів побудови правил і виведення; розглянуто задачу прогнозування зв'язку між парою сутностей, що визначає наявність відношення для фактів; запропоновано узагальнений підхід для подання фактів, що дає змогу використовувати ефективні алгоритми пошуку правил. Для вирішення перелічених завдань застосовано такі **методи**: алгебра скінченних предикатів і предикатних операцій для подання знань, методи прогнозування зв'язку між парою сутностей на основі репрезентативного навчання для автоматичного видобування правил. Здобуто такі **результати**: розглянуто підхід до формування правил, що дає змогу структурувати наявні факти як сукупність двійкових предикатів та застосувати автоматичні методи побудови правил і виведення; зроблено висновок, що обмеженням повторного використання знань є структура бази знань і програмне забезпечення, яке використовується для її підтримки; сформульовано принципи побудови специфічних предикатів-концентраторів для подання атрибутів, що дає змогу узагальнити предикатне подання фактів та застосувати автоматичні методи видобування правил, що підвищує ефективність повторного використання знань. **Висновки**: застосування методу й механізму ідентифікації на основі предикатних операцій і специфічних предикатів, що автоматично видобувають атрибути з бази знань, разом з оцінкою якості виведених правил дали змогу запропонувати узагальнений підхід для подання фактів і використати ефективні алгоритми пошуку правил, що допоможе підвищити ефективність повторного застосування знань у програмних системах.

Ключові слова: програмна інженерія; бази знань; повторне використання знань; алгебра скінченних предикатів; факти; правила.

Вступ

У сучасному глобальному світі, де ринки повністю інтернаціоналізовані, середовище швидко змінюється, а конкуренція зростає, компанії борються за переваги та їх збереження. Оскільки інтернет зробив інформацію глобальною та доступною, більшість компаній намагаються використовувати цей інтелектуальний капітал, щоб впливати на результати своєї діяльності й отримувати прибуток. В епоху інтелекту люди усвідомлюють, що знання можуть допомогти в прийнятті рішень, уникнути повторення помилок і втрати часу. Крім того, повторне використання знань є менш дорогим, ніж їх набуття. З цією метою з'явилася концепція управління знаннями. Управління знаннями – це процес збирання, розвитку, спільного та ефективного використання організованих знань [1]. На сьогодні створено різні процеси управління знаннями, щоб уможливити застосування цього ресурсу [2–4]. Проте цінні знання все одно втрачаються.

Оскільки повторне використання знань є одним із найважливіших етапів процесу управління знаннями, у літературі можна знайти кілька досліджень про цей етап [5]. Компанії у всьому світі витрачають час, зусилля та гроші, намагаючись залучити найефективніші системи управління знаннями. Розглядаються не лише програмні засоби, а й культурні та стратегічні аспекти [4]. Однак повторного використання знань не відбувається або принаймні бажані результати не досягаються. Зазвичай припускають, що як тільки знання будуть належним чином збережені, їх повторне застосування відбудеться автоматично.

Отже, питання, на яке потрібно відповісти, полягає в тому, як можна створювати бази знань, щоб їх можна було ефективно використовувати. Для цього необхідно проаналізувати системи повторного використання знань, запропонувати підхід щодо створення бази знань та оцінити запропоноване рішення.

Метою дослідження є підвищення ефективності повторного використання знань у програмних системах на основі баз знань способом автоматичного видобування правил.

Аналіз проблеми й наявних методів

Ще на початку 90-х, коли знання стали визнавати важливим активом для підприємств, з'явилася концепція управління знаннями. Водночас виникло багато нових запитань. Що таке знання? Чи всі отримані знання цінні? Чи дані, інформація та знання одне й те саме? Численні дослідження присвячені тому, щоб знайти загальну відповідь на ці запитання. У літературі можна знайти досить схожі визначення. Але в цій статті звернемо увагу на найбільш поширені дефініції. Зокрема в роботі [6] дані названо "неорганізованими та необробленими фактами", тоді як інформація розглядається як "сукупність оброблених даних, що полегшує прийняття рішень". На відміну від попередніх термінів, "знання – це оцінена та організована інформація, яку можна цілеспрямовано використовувати в процесі вирішення проблем". Існує більш глибоке визначення лексеми "знання" – "це здібність, уміння, досвід маніпулювати, перетворювати, створювати дані, інформацію, ідеї для вмілого виконання, прийняття рішень, вирішення проблем" [7]. Отже, дані та інформацію легко зберігати, описувати та маніпулювати ними, тоді як знання потребують повного процесу розуміння, і тому є чимось активним, що може бути створено, трансформовано й актуалізовано.

Генерація знань вимагає не лише часу, але й значного досвіду щодо теми. Крім того, процес генерації здебільшого відбувається в розумі людини, його не можна спостерігати. Тому важко розпізнати, як формуються нові знання, і задокументувати результати. Отже, процес генерації знань можна розуміти як природний процес оброблення даних у інформацію, а потім і в знання.

Намагаючись максимально використати знання компанії, з'явилася дисципліна "Управління знаннями", що розуміється як "процес збирання, розвитку, обміну та ефективного використання організованих знань" [1]. З метою створення цінності для компанії цей системно-орієнтований підхід претендує на те, щоб бути не лише важливим фактором успіху компанії, але й ключем до інновацій. Єдина мета управління знаннями полягає не в тому, щоб стати більш обізнаним, а в тому, щоб краще усвідомити

можливі рішення проблем, які вже існують, і те, як до них отримати доступ. Сам процес управління знаннями дослідники поділяють на етапи.

Перший етап – набуття знань. Набуття – це створення нових знань, а також їх пошук. Коли знання вже існують, люди мають шукати їх у певному сховищі; коли йдеться про створення знань, відбувається процес трансформації. Загальновізнано, що знання бувають *явними* (їх можна задокументувати) або *неявними* (для передачі цих знань необхідна особиста взаємодія), і вони мають розглядатися в процесі створення [1, 5]. Трансформація здатна відбуватися за допомогою чотирьох режимів [5]:

- соціалізація: неявні знання перетворюються на нові неявні знання;
- екстерналізація: неявне знання стає явним знанням;
- комбінація: явні знання сприяють новим явним знанням;
- інтерналізація: користувачі інтегрують явні знання у свої процедури, і в такий спосіб вони стають неявними знаннями.

Нові знання можна розрізнати як додаткові або замінні.

Другий етап – документування. На цьому етапі знання фіксуються, документуються, зберігаються та готуються для передачі та подальшого повторного використання.

Третій етап – передача знань. Необхідно проаналізувати складні зв'язки між джерелом знань і метою. Основні види діяльності цього етапу охоплюють визнання потреб у повторному застосуванні, підтримку процесів поширення та сприяння розвитку знань.

Четвертий етап – це повторне використання. Йдеться про перше застосування переданих знань. Люди мають спочатку знати, що вони шукають, бути здатними обрати відповідні знання і, нарешті, застосувати їх.

Останній, п'ятий, етап передбачає всі дії, пов'язані із захистом знань. Про цей етап часто забувають, а деякі автори навіть не розглядають його як частину процесу управління знаннями.

ІТ надають підтримку щодо двох основних підходів до управління знаннями. Вони називаються *кодифікацією* та *персоналізацією* [5]. За допомогою кодифікаційного підходу більш чіткі та структуровані знання кодифікуються й зберігаються в базах знань (електронних сховищах знань); відповідно до підходу персоналізації неявні та неструктуровані знання

поширюються завдяки особистому спілкуванню. Реалізація обох підходів є необхідною для управління знаннями.

Однією з найбільш важливих фаз є *повторне використання знань*. Часто, як тільки документ або частину знань знайдено, їх повторне застосування не розглядається. З іншого боку, непросто оцінити вплив повторного використання знань під час певного проекту, крім того, внесок повторного застосування знань в успіх проекту неможливо виміряти. Повторне використання знань відбувається як всередині людини, так і зовні. Цікавим фактом є те, що хоча внутрішнє повторне застосування здебільшого успішне, зовнішнє – ні. Внутрішнє повторне використання спирається на найдосконалішу базу знань – мозок людини, де набуття, документування та перетворення знань відбувається автоматично, найбільш інстинктивним способом. Дослідники з'ясували, що людина може швидко знаходити багаторазові предмети у своїй пам'яті, крім того, вона запам'ятовує контекст кожного предмета та розуміє ціле, уможливаючи більш ефективно повторне використання [5].

Мета статті – розробити підхід до підвищення ефективності повторного застосування знань у програмних системах на основі баз знань способом автоматичного видобування правил. Для досягнення поставленої мети необхідно розглянути підходи до структурування наявних у базі даних фактів; провести якісний аналіз можливості застосування автоматичних методів побудови правил і виведення; проаналізувати задачу прогнозування зв'язку між парою сутностей, що визначає наявність відношення для фактів; запропонувати узагальнений підхід для подання фактів, що дає змогу використовувати ефективні алгоритми пошуку правил.

Вирішення завдання

Під час спроби повторного використання зовнішніх знань виникають певні проблеми. По-перше, людина може не розуміти важливості документування. Документація також часто обмежується формальними знаннями, а аргументація чи контекст, що стоять за прийнятими рішеннями, відсутні. Крім того, важливу роль відіграє відсутність механізмів для визначення, пошуку та відновлення багаторазового використання знань.

Можна зробити висновок, що проблема повторного використання має три основні причини.

Перша стосується розуміння контексту та застосованого рішення, друга причина стосується змісту знань, що документуються, і третя – усієї системи бази знань або програмного забезпечення, яке використовується для її підтримки.

Коли говорять про обмін і повторне застосування знань, існує припущення, що знання можна відтворювати та переміщувати з місця на місце; речовина, яку можна отримати від людей-експертів і перенести з однієї комп'ютерної системи чи програми в іншу. Але як можна запропонувати поділитися тим або повторно використовувати те, що не має таких властивостей, як локальність і стійкість? Філософи та інші науковці роками досліджували це питання [4, 8]. Знання розглядається як абстракція, що неможливо записати й ніколи не можна мати в руках. Знання – це те, що спостерігач пояснив би розумному агенту й що дало б змогу агентові раціонально моделювати свою поведінку для досягнення певних цілей, які визначаються відповідно до того, що він дізнався від спостерігача.

Отже, знання можна розглядати як здатність реагувати певним чином, а не як матеріальну субстанцію. Навіть дані, які використовуються для відтворення знань, не можна вважати такими. Правила, символи та фрейми не можуть генерувати розумну поведінку як таку.

Якщо припустити, що все вищезазначене виконано, то проблема ІТ-підтримки процесу управління знаннями все ще потребує вирішення. Метою поточних баз знань є сприяння обміну знаннями та повторному використанню. Для подання знань необхідно враховувати значну кількість факторів. Термінології, онтології та методи вирішення проблем – це декілька з них [9]. Проблема полягає в тому, щоб мати змогу поділитися знаннями, які містяться в різних базах знань, оскільки всі ці фактори відрізняються від однієї бази до іншої. Несумісність систем і форматів також унеможливає об'єднання двох баз знань.

Можна виокремити чотири основні причини.

1. Неоднорідність подання. Тут існує кілька підходів, але один формалізм подання не може бути безпосередньо включений в інший. Не існує універсального формалізму подання знань, який би ідеально відповідав усім вимогам, і тому обмін знаннями передбачає переклад змісту однієї бази в іншу.

2. Мовні діалекти. Обмін знаннями між системами може бути дуже складним, якщо знання були

закодовані різними діалектами. Це може повністю змінити зміст повідомлення або його інтерпретацію.

3. Відсутність визначених правил спілкування. Теоретично окремі системи можуть спілкуватися одна з одною й у такий спосіб мати користь від обміну знаннями, не маючи спільної бази. Але зазвичай це неможливо, оскільки бракує узгодженого протоколу, який би давав змогу системам взаємодіяти між собою та запитувати одна одну.

4. Невідповідності моделі на рівні знань. Навіть у разі усунення всіх перешкод проблеми з термінологією також стануть на заваді для ефективного спілкування між різними базами. Відсутність спільного словникового запасу не дає змогу зіставити знання однієї бази з іншою.

Отже, повторне використання знань або обмін знаннями, що містяться в різних базах, є дуже складним завданням.

Для подання знань у інформаційних системах застосовуються різні формальні мови, зокрема обчислення предикатів. Воно має однозначну формальну семантику та операційну підтримку у вигляді досконалого механізму виведення. Мовою алгебри предикатів будь-яка множина $U = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ може бути записана у вигляді рівняння $x^{a_1} \vee x^{a_2} \vee \dots \vee x^{a_n} = 1$, де x – предметна змінна [10]. Сукупність усіх коренів цього рівняння збігається з множиною U . Рівняння є формальним записом твердження $x \in U$. Методи ідентифікації та подання знань з використанням алгебри предикатів здатні уможливити одноманітне подання знань у вигляді рівнянь алгебри предикатів.

Алгебра предикатів описує лише знання про факти. Алгебра операцій над предикатами або алгебра предикатних операцій має формалізувати операції над знаннями, поданими як відношення на деякому предметному просторі. Алгебра предикатів визначає декларативний складник знань, а алгебра предикатних операцій – процедурний складник знань.

Виокремлюють два типи фактів: перший описує зв'язок двох сутностей, до того ж одна з них буде визначатися як суб'єкт, а друга – як об'єкт предикатної дії [11]. У першому випадку факт – це триплет "*суб'єкт – предикат – об'єкт*", у якому предикат є відношенням, а суб'єкт і об'єкт указують на два предмети. Другий вид факту – триплет "*предмет – атрибут – значення*", де предмет – це об'єкт, про який фіксується факт, атрибут – іменована ознака об'єкта, що заздалегідь має певну

властивість, а значення – деяке значення цієї ознаки, область визначення якої може бути в деяких випадках відома. Наприклад, це можуть бути факти атрибутів місця й часу здійснення певної дії. Факти другого типу дають змогу розбивати множину сутностей на класи еквівалентності та звузити простір пошуку шляхів висновку. Для отримання таких трійок, визначення сутностей, що їх утворюють, існує чимало підходів [12, 13]. Завдання ставиться як задача прогнозування зв'язку між парою сутностей, що власне визначає: чи пов'язана пара сутностей через відношення.

Останнім часом значна увага приділяється створенню великих баз знань, що містять мільйони фактів про різні сутності у світі. Ці бази знань виявилися неймовірно корисними для інтелектуального пошуку в інтернеті, розуміння запитань, контекстної реклами, аналізу соціальних медіа та біомедицини. Завдяки новим можливостям такі сучасні бази знань часто називають графами знань. Основним завданням у побудові графа знань є розроблення масштабованих методів для автоматизованого навчання нових сутностей, їх властивостей і зв'язків. Правила є явними знаннями (порівняно з нейронною мережею) і можуть надавати людині зрозумілі пояснення результатів навчання (наприклад, прогнозування зв'язків) на їх основі. Отже, важливо автоматично отримувати правила.

Традиційні методи вивчення правил не можуть бути безпосередньо використані для побудови правил з кількох причин. По-перше, ці методи недостатньо масштабовані, щоб обробити величезну кількість даних, яка міститься в звичайних графах знань. Крім того, графи знань явно не виражають негативних прикладів, які є важливими для багатьох інструментів інтелектуального аналізу даних. З іншого боку, у парадигмі репрезентативного навчання статистичні прогностичні моделі широко застосовуються для вивчення фактів, що явно відсутні в базі знань [12, 14]. Основна ідея полягає в кодуванні реляційної інформації за допомогою вбудовування сутностей і предикатів, а потім у використанні їх для керування вилученням правил і в такий спосіб для зменшення простору пошуку.

Отже, будемо розглядати дві категорії фактів: ті, що є зв'язками сутностей, і ті, що стосуються атрибутів сутностей. Необхідно зауважити, що атрибути сутності часто містять незначну кількість сутностей для подання значень атрибутів, які пов'язані з величезною кількістю інших сутностей. Тобто атрибути сутності можуть бути концентратором

і є природною основою для розподілу на класи еквівалентності. Наявні підходи до вивчення правил часто не розрізняють атрибути сутності від зв'язків сутності.

$$p_1(x_0, x_1) \wedge \dots \wedge p_n(x_{n-1}, x_n) \wedge a_1(x_{l_1}) \wedge \dots \wedge a_m(x_{l_m}) \rightarrow p(x_0, x_n), \quad (1)$$

де кожен $x_i (0 \leq i \leq n)$ є змінною і $0 \leq l_j \leq n$ для кожного $1 \leq j \leq m$.

Кожен $p(u, v)$ називається атомом, а u і v – відповідно аргументами суб'єкта та об'єкта для p , і кожен $a(u)$ є атомом, де a є унарним предикатом. Інтуїтивно правило r стверджує, що якщо $p_1(x_0, x_1), \dots, p_n(x_{n-1}, x_n), a_1(x_{l_1}), \dots, a_m(x_{l_m})$ виконується, то $p(x_0, x_n)$ також виконується. Атом $p(x_0, x_n)$ є головою (головним атомом) правила r , і набір атомів $\{p_1(x_0, x_1), \dots, p_n(x_{n-1}, x_n), a_1(x_{l_1}), \dots, a_m(x_{l_m})\}$ є тілом правила r . Правило, отримане з r способом видалення унарних предикатів у тілі, тобто $p_1(x_0, x_1) \wedge \dots \wedge p_n(x_{n-1}, x_n) \rightarrow p(x_0, x_n)$, зазвичай називають правилом замкнутого шляху (*closed-path rule*), оскільки послідовність предикатів у тілі правила формує шлях від аргументу суб'єкта до аргументу об'єкта головного предиката [14, 15].

В основних підходах до вивчення правил [15] розглядаються такі положення. Нехай r – правило. Пара сутностей (e, e') задовольняє тіло r , позначене як $body(r)(e, e')$. Якщо існує спосіб замінити змінні в $body(r)$ сутностями в базі знань таким чином: (1) усі атоми в $body(r)$ (після заміни) є фактами в базі знань, і (2) x_0 і x_n замінено на e і e' відповідно. І (e, e') задовольняє голову r , позначену як $p(e, e')$, якщо $p(e, e')$ є також фактом у базі знань. Тоді ступінь підтримки правила r визначається як

$$supp(r) = \#(e, e') : body(r)(e, e') \wedge p(e, e'). \quad (2)$$

Тобто ступінь підтримки правила $supp(r)$ визначається як кількість пар об'єктів, що задовольняють як голову, так і тіло правила r .

Ступінь упевненості правила r $SC(r)$ і покриття голови правила r $HC(r)$ визначаються як форми нормалізації для ступеня підтримки $supp(r)$:

$$SC(r) = \frac{supp(r)}{\#(e, e') : body(r)(e, e')}, \quad (3)$$

Дотримуючись конвенції в поданні знань, будемо позначати факт як $p(e, e')$, де сутність e пов'язана з іншою сутністю e' через скінченний двійковий предикат p . Розглянемо основні положення щодо визначення правил [14, 15]. Правило r має форму:

$$HC(r) = \frac{supp(r)}{\#(e, e') : p(e, e')}. \quad (4)$$

Отже, $SC(r)$ є нормалізацією $supp(r)$ через кількість пар сутностей, що задовольняють тіло, тоді як $HC(r)$ є нормалізацією $supp(r)$ через кількість пар сутностей, що задовольняють голову.

Метод репрезентативного навчання складається з двох основних кроків: (1) вбудовування сутностей і предикатів бази знань у латентний простір і (2) побудова моделі навчання на основі отриманих убудовувань для передбачення нових фактів [14]. Для побудови вбудовувань можна використовувати такий підхід. Кожна сутність e перетворюється на вектор E і кожен предикат p – у матрицю \mathbf{P} . Тоді для кожного заданого факту $p_0(e, e')$ обчислюється наступна функція оцінки:

$$f(e, p_0, e') = E^T \cdot \mathbf{P}_0 \cdot E'. \quad (5)$$

Функція оцінки вказує на правдоподібність факту $p_0(e, e')$. Завдання пошуку правил можна звести до завдання пошуку правдоподібних шляхів предикатів. Це досягається за допомогою введення функції оцінки для всіх можливих шляхів. Щоб визначити таку функцію оцінки, шлях $P = p_1, p_2, \dots, p_n$ розглядається як двійковий предикат між початковою та кінцевою сутністю, а p є правдоподібним, якщо пара сутностей, пов'язаних шляхом, подібна до тих, що асоціюються з цільовим предикатом p_i . Така подібність між p і p_i називається синонімією, коли два предикати пов'язують подібні пари сутностей. Отже, функція оцінки має враховувати довжину шляху та синонімію. Крім цього, важливо оцінити правила за ступенем впевненості $SC(r)$ та покриття голови $HC(r)$.

Як показано в роботі [14], такий підхід дає змогу побудувати алгоритм, здатний визначити правила в базі даних, де факти подано двійковими предикатами, що виражають зв'язки сутностей. Але запропонований підхід має певні обмеження

щодо фактів другого типу, тобто атрибутів сутностей. Щоб ідентифікувати факти атрибутів $p(e, e')$, потрібно визначити e' , який можна використовувати для значень атрибутів, і p , що підходить для подання атрибутів. Тобто потрібно ідентифікувати значення атрибутів e' і предикати атрибутів p .

Важливо зауважити, що значення атрибутів часто пов'язані з величезною кількістю об'єктів і, отже, утворюють своєрідні концентратори. Такі концентратори пропонується ідентифікувати за щільністю їх з'єднання. Визначаємо щільність концентратора $den(e, p)$ у такий спосіб:

$$den_{in}(e, p) = \frac{\#e' : p(e', e)}{\#(e', e'') : p(e', e'')}, \quad (6)$$

$$den_{out}(e, p) = \frac{\#e' : p(e, e')}{\#(e', e'') : p(e', e'')}, \quad (7)$$

де $den_{in}(e, p)$ і $den_{out}(e, p)$ – внутрішня та зовнішня щільність відповідно; $\#e'$ – загальна кількість випадків e (як суб'єкта чи об'єкта) у факті $p(e, e')$ або $p(e', e)$.

Необхідно зазначити, що концентратор e з високою щільністю не обов'язково підходить для значення атрибута. Розглянемо екстремальний випадок, коли всі інші сутності e' пов'язані з e через предикат p , тоді e не є значенням атрибута, яке може відрізнити e' від інших сутностей. З інформаційної теорії такий атрибут не забезпечує жодного інформаційного приросту, оскільки він не виражає жодної відмінної особливості асоційованих сутностей. Отже, нам потрібно обрати концентратори, які мають високу щільність і відмінні особливості. У роботі [15] пропонується обчислити ентропію концентраторів, а потім, разом з оцінкою ступеня дисбалансу, визначити ймовірність факту з концентратором e та предикатом p , що є атрибутом сутності. Тобто $p(e', e)$ виражає факт, що e' є сутністю, а e – значенням атрибута. Це дає змогу ідентифікувати факти атрибутів у базі знань.

Загалом атрибути можна розглядати як унарні предикати, тоді як інші відношення є бінарними. Однак такий унарний факт не може бути безпосередньо оброблений такими алгоритмами, як запропоновано в роботі [14], оскільки вони приймають лише двійкові предикати (тобто трійки) як вхідні дані. Формально кожен факт атрибута виду

$p(e, e')$ (або $p(e', e)$) з e' , що є значенням атрибута, може бути перетворений на факт $P : p_E : e'(e, e)$ (відповідно, $E : e'_P : p(e, e)$), де $P : p_E : e'$ (відповідно, $E : e'_P : p$) є новим предикатом. Ідея такого перетворення полягає в тому, щоб подати атрибути як самоцикли в графі знань (подані бази знань), щоб метод навчання правил на основі шляхів можна було легко адаптувати, тоді як атоми атрибутів (як самоцикли) можна буде зручно ідентифікувати у визначених правилах.

Є низка робіт, у яких описано застосування визначених на основі навчання правил до відомих фактів для виведення нових фактів у базі знань. Більшість цих праць присвячена тому, як можна використовувати правила ітераційно [16]. Існують інші дослідження, що розглядають одноразове застосування правил невизначеності в спільноті графів знань [12, 15]. Деякі підходи доповнюються ступенем достовірності, і модуль висновку враховує ці ступені, щоб вивести новий факт (який також доповнюється ступенем достовірності). Щоб контролювати якість і кількість нових висновків, ці системи встановлюють максимальний поріг кількості нових фактів і мінімальний поріг достовірності нових фактів. Проблемою такого підходу є те, що такі методи не враховують вимоги щодо кожного нового факту – вони лише зосереджуються на процесі, результатом якого є нові факти.

У цьому дослідженні, на відміну від наявних підходів до моделювання атрибутів, що використовують атрибути як вхідні дані, запропоновано видобувати атрибутивні правила з бази знань без явного набору атрибутів. Це досягається способом використання двійкового предиката атрибута, який можна легко вбудувати в правила закритого шляху, і механізму ідентифікації, що автоматично видобуває такі атрибути з бази знань. Отже, база знань доповнюється особливими предикатами – концентраторами – та відповідними фактами і може бути оброблена методами репрезентативного навчання для видобування правил, що в сукупності з оцінкою якості виведених правил дасть змогу підвищити ефективність використання баз знань.

Приклад

Розглянемо на прикладі, як можна застосувати запропонований підхід. Нехай $K = (E, F)$ – база

знань, де $E = \{e_1, \dots, e_n\}$ – множина всіх сутностей; $F = \{P_1, \dots, P_m\}$ – множина всіх предикатів. Можемо подати вхід бази знань як набір A матриць суміжності, де кожна $n \times n$ матриця $A(P_k)$ відповідає предикату P_k у базі знань ($1 \leq k \leq m$). Зокрема $A[i, j]$ дорівнює 1, якщо факт $P_k(e_i, e_j)$ міститься в K ; та 0 в іншому випадку. Отже, $A(P_k)$ є матрицею двійкових значень.

Проілюструємо це. Розглянемо правило $r: P_1(x, z) \wedge P_2(z, y) \rightarrow P(x, y)$. Щоб обчислити SC і HC для правила r у базі знань K , нам потрібно обчислити кількість пар сутностей, що задовольняють голову правила r (тобто $\#(e, e') : p(e, e')$), які задовольняють тіло правила r (тобто $\#(e, e') : body(r)(e, e')$), і які задовольняють як голову, так і тіло (тобто $supp(r)$) відповідно. Пари (e_i, e_j) , що задовольняють голову, можна безпосередньо прочитати з матриці $A(P)$, тобто де $A(P)[i, j] = 1$. Для пар (e_i, e_j) , які задовольняють тіло, необхідно зауважити, що вони з'єднані шляхом $p = P_1, P_2$ і можуть бути отримані з добутку $A(P_1) \cdot A(P_2)$ двох матриць $A(P_1)$ і $A(P_2)$. Зокрема елемент $[i, j]$ матриці $A(P_1) \cdot A(P_2)$ подає кількість шляхів правила, які починаються від e_i , проходять через P_1 до іншої сутності та врешті йдуть до e_j через P_2 . Але в цьому разі матриця $A(P_1) \cdot A(P_2)$

може мати недвійкові значення. Нехай $A(P_1, P_2) = binary(A(P_1) \cdot A(P_2))$, де $binary(M)$ – це матриця, отримана з матриці M установкою всіх ненульових елементів на 1. Отже, пари (e_i, e_j) , що задовольняють тіло, можна побачити з $A(P_1, P_2)$, тобто де $A(P_1, P_2)[i, j] = 1$. Покажемо на прикладі.

Нехай $E = \{e_1, e_2, e_3\}$ та $F = \{P_1(e_1, e_2), P_1(e_2, e_1), P_1(e_1, e_3), P_2(e_2, e_3), P_2(e_2, e_1), P_2(e_3, e_3), P(e_1, e_3)\}$. Тоді матриці суміжності для предикатів P_1 , P_2 і P записуються таким чином:

$$A(P_1) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad A(P_2) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A(P) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\text{тоді } A(P_1) \cdot A(P_2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \xrightarrow{binary()} A(P_1, P_2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Матриця $A(P_1, P_2)$ показує пари, з'єднані шляхом $p = P_1, P_2$, тобто $\{(e_1, e_2), (e_1, e_3)\}$, і це саме ті пари, які задовольняють тіло правила r . І з огляду на $A(P)$ є тільки одна пара (e_1, e_3) , що задовольняє голову r . Тоді можемо легко отримати, що $supp(r) = 1$, $HC(r) = 1$ і $SC(r) = 0,5$.

Необхідно зауважити, що хоча цей приклад базується на правилах довжини, цей розрахунок легко узагальнити до правил будь-якої довжини.

У табл. 1 наведено приклади фактів, що містяться в базі знань як множина трійок у форматі RDF.

Таблиця 1. Фрагмент бази знань

Сутність e	Предикат p	Сутність e'
<Princess_Marie_Louise_of_Parma>	<isMarriedTo>	<Ferdinand_I_of_Bulgaria>
<Sebastian_Faulks>	<created>	<Birdsong_(novel)>
<Sebastian_Faulks>	<created>	<Charlotte_Gray_(film)>
<Sebastian_Faulks>	<created>	<A_Fool's_Alphabet>
<Brian_K_Vaughan>	<created>	<Runaways_(comics)>
<Brian_K_Vaughan>	<created>	<Pride_of_Baghdad>
<August_Aleksander_Czartoryski>	<isMarriedTo>	<Maria_Zofia_Sieniawska>
<Jerzy_Detloff_Fleming>	<hasChild>	<Izabela_Czartoryska>
<Antonina_Czartoryska>	<hasChild>	<Izabela_Czartoryska>
<Kenneth_Waltz>	<influences>	<Stephen_Walt>
<Marie_of_Brabant>	<isMarriedTo>	<Queen_of_France,Philip_III_of_France>
<Cynthia_Lennon>	<isMarriedTo>	<John_Lennon>
<Ferdinand_I_of_Aragon>	<hasChild>	<Alfonso_V_of_Aragon>
<Azerbaijan>	<hasCapital>	<Baku>
<The_Rolling_Stones>	<created>	<Dirty_Work_(album)>
...

Спочатку оцінюємо правила-кандидати на основі вибірки K' і обираємо правила, для яких $supp(r) \geq 1$. Ці правила все ще можуть містити велику кількість надлишкових і низькоякісних правил, тому необхідно зробити подальший відбір на основі двох показників – HC та SC . Для обчислення значень HC та SC потрібно перевірити, чи задовільняють усі атоми тіла

$$hasChild(x, t) \wedge hasChild^{-1}(t, z) \wedge isCitizenOf(z, y) \rightarrow isCitizenOf(x, y).$$

Отримані наведеним методом оцінки $SC = 0,89$ та $HC = 0,13$ показують, що ступінь впевненості високий, тобто ступінь достовірності факту забезпечується правилами з бази знань.

Висновки

Графи знань виявилися корисними для побудови взаємозв'язків між джерелами інформації способом з'єднання об'єктів різних типів, вони надають формальний базис створення та ефективного використання баз знань у процесі проектування інтелектуальних програмних систем. У штучному інтелекті граф знань подається зазвичай набором трійок: "суб'єкт – предикат – об'єкт" або "об'єкт – атрибут – значення". Для отримання таких трійок, визначення сутностей, що їх утворюють, існує багато інструментів, але, як показав проведений аналіз,

всіх правил-кандидатів на останній фазі. Іншими словами, потрібно визначити всі релевантні атоми, які можуть запустити правило кандидата. У цьому разі маємо базу знань або вибірку з неї KG і правило замкнутого шляху як вхідні дані.

Наприклад, для наступного правила:

вони мають обмеження щодо масштабування, репрезентативного навчання та інтерпретації правил і механізмів їх виведення. Розглянуто задачу прогнозування зв'язку між парою сутностей, що визначає наявність відношення для обох типів фактів. Запропоновано узагальнений підхід для подання фактів, що дає змогу використовувати ефективні алгоритми пошуку правил.

Методи ідентифікації та подання знань із застосуванням алгебри предикатів можуть допомогти одноманітно подати знання у вигляді рівнянь алгебри предикатів. Будь-яке рівняння алгебри предикатів можна реалізувати програмно як відповідну йому агентно-предикатну структуру. Отже, подальші дослідження варто присвятити створенню агентно-предикатної структури розв'язання рівнянь і пошуку правил.

Список літератури

1. Koenig M. E. D. What is KM? Knowledge management explained. *KMWorld Magazine*. URL: <https://www.kmworld.com/Articles/Editorial/What-Is-.../What-is-KM-Knowledge-Management-Explained-82405.aspx>
2. Ma L., Yu H., Wang Y., Chen G. (2012). The Knowledge Representation and Semantic Reasoning Realization of Productivity Grade Based on Ontology and SWRL. *Computer and Computing Technologies in Agriculture V. CCTA 2011. IFIP Advances in Information and Communication Technology*, vol 368. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27281-3_44
3. D. Moshood T., Eburn Rotimi F., O. B. Rotimi J. (2022). An Integrated Paradigm for Managing Efficient Knowledge Transfer: Towards a More Comprehensive Philosophy of Transferring Knowledge in the Construction Industry. *Construction Economics and Building*, 22(3). <https://doi.org/10.5130/AJCEB.v22i3.8050>
4. Chen Z., Wang Y., et al. Knowledge graph completion: A review. *IEEE Access* Vol. 8. 2020. P. 192435–192456. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/iel7/6287639/8948470/09220143.pdf>
5. Schacht S., Maedche A. A Methodology for Systematic Project Knowledge Reuse. *Innovations in Knowledge Management. Razmerita, L. (Eds.), Springer (Berlin)*. 2016. P. 19-44. DOI:10.1007/978-3-662-47827-1_2
6. Ameri F., Dutta D. Product lifecycle management: closing the knowledge loops. *Computer-Aided Design and Applications* 2 (5). 2005. P. 577–590. DOI:10.1080/16864360.2005.10738322
7. Shubin I. Development of conjunctive decomposition tools. *CEUR Workshop Proceedings (COLINS 2021). Vol. 1*, 2021. P. 890–900. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2870>
8. Milton N. R. Knowledge acquisition in practice: a step-by-step guide. Springer Science & Business Media. 2007. URL: https://www.researchgate.net/publication/234798481_Knowledge_Acquisition_in_Practice_A_Step-by-step_Guide
9. Saavedra C., Villodres T., Lindemann U. Review and Classification of Knowledge in Engineering Design. *Technische Universit chen*. 2017. DOI:10.1007/978-981-10-3521-0_53
10. Martin Ph., Bénard J. Top-level Ideas about Importing. *Translating and Exporting Knowledge via an Ontology of Representation Languages. In Proceedings of the 12th International Conference on Semantic Systems (2016)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. P. 89–92. DOI: <https://doi.org/10.1145/2993318.2993344>

11. Khudhair A. T. The intelligence theory mathematical apparatus formal base. *Advanced Information Systems*, 1 (1), 2017. P. 38–43. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.1.07>
12. Sharonova N. et al. Issues of Fact-based Information Analysis. *International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems*. 2018. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2136/10000011.pdf>
13. Omran P. G., Wang K., Wang Z. An Embedding-based Approach to Rule Learning in Knowledge Graphs. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. 2021. vol. 33, no. 4. P. 1348-1359. URL: <https://doi.org/10.1109/TKDE.2019.2941685>
14. Pellissier-Tanon T., Weikum G., Suchanek F. YAGO 4: A Reasonable Knowledge Base. *ESWC*. 2020. URL: <https://suchanek.name/work/publications/eswc-2020-yago.pdf>
15. Omran P. G., Wang Z., Wang K. Learning Rules With Attributes and Relations in Knowledge Graphs. *AAAI Spring Symposium: MAKE*. 2022. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3121/paper10.pdf>
16. Omran P. G., Wang Z., Wang K. Scalable rule learning via learning representation. *IJCA*. 2018. URL: <https://www.ijcai.org/proceedings/2018/0297.pdf>
17. Svato M., Schockaert S., Davis J. STRiKE: Rule-Driven Relational Learning Using Stratified k-Entailment. *ECA*. 2020. URL: https://orca.cardiff.ac.uk/130911/http://orca.cf.ac.uk/130911/1/ECAI2020_STRiKE.pdf
18. Малєва Ю. А., Персиянова Е. Ю., Косенко В. В. Информационное и программное обеспечение менеджера по персоналу IT-компаний. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій у промисловості*. 2018. № 1 (3). С. 22–32. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2018.3.022>
19. Barkovska O. Research into Speech-to-text Transformation Module in the Proposed Model of a Speaker's Automatic Speech Annotation. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій у промисловості*. 2022. № 4 (22). С. 5–13. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.22.005>

References

1. Koenig, M. E. D. (2012), "What is KM? Knowledge management explained. KMWorld Magazine", available at: <https://www.kmworld.com/Articles/Editorial/What-Is-.../What-is-KM-Knowledge-Management-Explained-82405.aspx>
2. Ma, L., Yu, H., Wang, Y., Chen, G. (2012), "The Knowledge Representation and Semantic Reasoning Realization of Productivity Grade Based on Ontology and SWRL", *Computer and Computing Technologies in Agriculture V. CCTA 2011. IFIP Advances in Information and Communication Technology*, Vol. 368. P. 381–389. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-27281-3_44
3. D. Moshood, T., Egun Rotimi, F., O. B. Rotimi, J. (2022), "An Integrated Paradigm for Managing Efficient Knowledge Transfer: Towards a More Comprehensive Philosophy of Transferring Knowledge in the Construction Industry", *Construction Economics and Building*, 22(3). DOI: <https://doi.org/10.5130/AJCEB.v22i3.8050>
4. Chen, Z., Wang, Y., et al. (2020), "Knowledge graph completion: A review", *IEEE Access*, Vol. 8. P. 192435–192456, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/iel7/6287639/8948470/09220143.pdf>
5. Schacht, S., Maedche, A. A. (2016), "Methodology for Systematic Project Knowledge Reuse", *Innovations in Knowledge Management*, Springer (Berlin). P. 19–44. DOI:10.1007/978-3-662-47827-1_2
6. Ameri, F., Dutta, D. (2005), "Product lifecycle management: closing the knowledge loops", *Computer-Aided Design and Applications*, 2 (5). P. 577–590. DOI:10.1080/16864360.2005.10738322
7. Shubin, I. (2021), "Development of conjunctive decomposition tools", *CEUR Workshop Proceedings*, P. 890–900. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2870/>
8. Milton, N. R. (2007), "Knowledge acquisition in practice: a step-by-step guide", *Springer Science & Business Media*, available at: https://www.researchgate.net/publication/234798481_Knowledge_Acquisition_in_Practice_A_Step-by-step_Guide
9. Saavedra, C., Villodres, T., Lindemann, U. (2017), "Review and Classification of Knowledge in Engineering Design", *Technische Universitaet Chemnitz*, DOI:10.1007/978-981-10-3521-0_53
10. Martin, Ph., Bénard, J. (2016), "Top-level Ideas about Importing", *Translating and Exporting Knowledge via an Ontology of Representation Languages. In Proceedings of the 12th International Conference on Semantic Systems*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, P. 89–92. DOI: <https://doi.org/10.1145/2993318.2993344>
11. Khudhair, A. T. (2017), "The intelligence theory mathematical apparatus formal base", *Advanced Information Systems*, 1(1), P. 38–43. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.1.07>
12. Sharonova, N. et al. (2018), "Issues of Fact-based Information Analysis", *International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems*, available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Issues-of-Fact-based-Information-Analysis-Sharonova-Doroshenko/f923b77b8561736202388db853e51df9bb7b9301>
13. Omran, P. G., Wang, K., Wang, Z. (2021), "An Embedding-based Approach to Rule Learning in Knowledge Graphs", *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, P. 1348–1359, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8839576>
14. Pellissier-Tanon, T., Weikum, G., Suchanek, F. (2020), "YAGO 4: A Reasonable Knowledge Base", *ESWC*, available at: <https://suchanek.name/work/publications/eswc-2020-yago.pdf>

15. Omran, P. G., Wang, Z., Wang, K. (2022), "Learning Rules with Attributes and Relations in Knowledge Graphs", *AAAI Spring Symposium: MAKE*, available at: <https://ceur-ws.org/Vol-3121/paper10.pdf>
16. Omran, P. G., Wang, Z., Wang, K. (2018), "Scalable rule learning via learning representation", *IJCAI*, available at: <https://www.ijcai.org/proceedings/2018/0297.pdf>
17. Svato, M., Schockaert, S., Davis, J. (2020), "STRiKE: Rule-Driven Relational Learning Using Stratified k-Entailment", *ECAI*, available at: https://orca.cardiff.ac.uk/130911/http://orca.cf.ac.uk/130911/1/ECAI2020_STRiKE.pdf
18. Malyeyeva, O., Persiyanova, E., Kosenko, V. (2018), "Information and software for the personnel manager of an IT company", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (3). P. 22–32. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2018.3.022>
19. Barkovska, O. (2022), "Research into Speech-to-text Transformation Module in the Proposed Model of a Speaker's Automatic Speech Annotation", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (22). P. 5–13. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.22.005>

Received 16.05.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Каратаєв Олександр Анатолійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри програмної інженерії, Харків, Україна; e-mail: tosanik@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-6654-1327>

Шубін Ігор Юрійович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри програмної інженерії, Харків, Україна; e-mail: igor.shubin@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1073-023X>

Karataiev Oleksandr – Kharkiv National University of Radio Electronics, Postgraduate, Kharkiv, Ukraine.

Shubin Ihor – PhD (Engineering Sciences), Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor at the Software Department, Kharkiv, Ukraine.

REUSE OF INFORMATION BASED ON THE INTERPRETATION OF KNOWLEDGE

Recently, much attention has been paid to the creation of knowledge bases that contain millions of facts about various objects of the real world. One of the key aspects of knowledge management is the reuse of previously acquired knowledge. The **subject of research** is the processes of knowledge reuse and the creation of software systems based on knowledge bases. Knowledge interpretation is one approach to knowledge reuse, which consists in deriving new knowledge based on existing facts in the knowledge base. The **purpose of the study** is to increase the efficiency of knowledge reuse in software systems based on knowledge bases due to automatic rule extraction. To achieve the goal, the following **tasks** were solved: approaches to structuring the facts available in the database were considered, a qualitative analysis of the possibility of applying automatic methods of rule construction and derivation was carried out. The task of predicting the connection between a pair of entities, which determines the presence of a relationship for facts, is considered. A generalized approach to the presentation of facts is proposed, which allows the use of efficient rule-finding algorithms. The following **methods** are used to solve the given problem: the algebra of finite predicates and predicate operations for knowledge representation, methods for predicting the connection between a pair of entities based on representative learning for automatically obtaining rules. The following **results** were obtained: an approach to rule formation was considered, which allows structuring existing facts as a set of binary predicates and applying automatic methods of rule construction and derivation. It is concluded that the limitation of knowledge reuse is the structure of the knowledge base and the software used to support it. The article formulates the principles of building specific concentrator predicates for the representation of attributes, which allows generalizing the predicate representation of facts and applying automatic methods of rule extraction, which increases the efficiency of knowledge reuse. **Conclusions:** the application of the method and mechanism of identification based on predicate operations and specific predicates, which automatically extracts attributes from the knowledge base, together with the quality assessment of the derived rules, made it possible to propose a generalized approach for presenting facts and use effective rule search algorithms, which allows to increase the efficiency of reuse knowledge in software systems.

Keywords: software engineering; knowledge bases; reuse of knowledge; algebra of finite predicates; facts; rules.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Каратаєв О. А., Шубін І. Ю. Проблеми повторного використання знань у процесі проєктування програмних систем. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 2 (24). С. 62–71. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.062>

Karataiev, O., Shubin, I. (2023), "Reuse of information based on the interpretation of knowledge", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (24), P. 62–71. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.062>

О. Клімшен, А. Красноручський, С. Кочук

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ Й ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ ДЛЯ ВДОСКОНАЛЕННЯ АВІАЦІЙНИХ ОПЕРАЦІЙ ПОШУКУ ТА РЯТУВАННЯ

Предметом дослідження в статті є підходи щодо вдосконалення бортового обладнання пошуково-рятувального повітряного судна (ПС). **Мета роботи** – розроблення пропозицій щодо вдосконалення технічних засобів пошуку повітряних суден, що зазнали аварії, а саме систем відеоспостереження та передачі інформації на пункти керування (ПК) пошуково-рятувальною операцією, на підставі аналізу Правил пошуково-рятувального забезпечення польотів державної авіації України та закордонного досвіду проведення пошуково-рятувальних робіт. Як пошуково-рятувальне повітряне судно (ПРПС) пропонується використовувати легкий багатоцільовий вертоліт типу Мі-2. У роботі вирішуються такі **завдання**: вивчення сучасних підходів до забезпечення проведення авіаційних пошуково-рятувальних робіт; аналіз технічних засобів забезпечення пошуку ПС, що зазнали аварії; розроблення пропозицій щодо способу передачі інформації з борту ПРПС на наземний пункт керування; вибір відповідного носія спеціального обладнання та окремих зразків системи відеоспостереження й передачі даних. Для розв'язання часткових завдань застосовується **метод** порівняльного аналізу. Здобуто такі **результати**: визначено вимоги до пошукових характеристик ПРПС, зокрема як ПРПС запропоновано використовувати легкий багатоцільовий вертоліт; подано схему організації зв'язку з пунктом керування пошуковою операцією з допомогою використання технологій бездротового зв'язку; сформульовано конкретні вимоги до окремих компонентів бортового спецобладнання ПРПС. **Висновки**. Упровадження технологій бездротового зв'язку разом із тепловізійною апаратурою підвищить швидкість та ефективність пошуку ПС, що зазнали аварії, особливо в нічний час та в умовах обмеженого бачення (туман, задимлення). Крім цього, розширюється коло завдань легких вертольотів типу Мі-2, а також збільшується кількість як бортових, так і наземних операторів, що безпосередньо застосовують тепловізійну апаратуру (ІЧ-камеру) для визначення місця падіння повітряного судна. У цьому разі не порушується загальна штатна кількість персоналу, що залучається для проведення пошуково-рятувальних робіт.

Ключові слова: авіаційний пошук і рятування; технології бездротового зв'язку; передача даних; компоненти обладнання; технічний зір; пошуково-рятувальне повітряне судно.

Постановка проблеми

Пошуково-рятувальне забезпечення є одним із видів удосконалення польотів авіації. У мирний час пошуково-рятувальні заходи здійснюються в єдиній системі проведення авіаційних робіт з пошуку й рятування – це державна система, у якій авіаційні рятувальники працюють разом із фахівцями ДСНС України [1]. Авіаційний пошук і рятування – комплекс заходів, спрямований на виявлення ПС, що зазнали або зазнають лиха, і надання вчасної допомоги потерпілим унаслідок авіаційної події.

Згідно з Правилами пошуково-рятувального забезпечення польотів державної авіації України, основним методом пошуку тих, хто зазнав лиха, є використання бортової радіотехнічної апаратури ПС (для вертольотів це автоматичний радіокомпас АРК-У2 з приймачем Р-852, автоматичний УКХ радіокомпас АРК-УД) за сигналами аварійних бортових засобів зв'язку (радіостанція Р-855УМ, аварійні радіомаяки типу ELT – ARTEX С-406-1 НМ1, АК-450, ЕВС-406АФНМ). Пошук також може передбачати візуальне обстеження членами екіпажу

ПРПС місця аварії. Як ПРПС можуть застосовуватися літаки і вертольоти [1]. Останні найбільш доцільно використовувати для виявлення повітряних суден, які зазнали аварії, зокрема в разі пошуку над лісовими масивами, місцевістю із болотами, а також у нічний час та за умов обмеженого бачення (задимлення, мряка). Швидке пересування транспорту аварійно-рятувальних служб також ускладнюють гори, скелясті пагорби та яри. У таких ситуаціях використання вертольота як ПРПС – найкраще рішення. Виникає необхідність визначення основних характеристик, за якими оцінюють ефективність пошуково-рятувальних повітряних суден, особливо коли йдеться про легкі вертольоти типу Мі-2.

Оскільки час реагування в надзвичайних ситуаціях критично важливий, прискорити виявлення місця падіння повітряного судна можливо завдяки застосуванню сучасних систем спостереження, таких як оптико-електронні, а також ті, що працюють у інфрачервоному діапазоні електромагнітного спектра. Крім того, для сучасних ІЧ-камер необхідний надійний канал зв'язку як для передачі даних із вертольота в командний або координаційний

центри (пункти керування) і наземним рятувальним підрозділам у разі потреби.

Аналіз останніх досягнень і публікацій

Удосконалення наявних технологій передачі даних разом із розробленням і впровадженням нових багатофункціональних обчислювальних комплексів, телекомунікаційних мереж, засобів автоматизації, інтегрованих в автоматизовану систему ведення авіаційних робіт під час пошуково-рятувальних заходів, суттєво вплине на зменшення часу реагування на аварійні події та інші надзвичайні ситуації з ПС, підвищить ефективність проведення авіаційних пошуково-рятувальних робіт в Україні [2, 3]. Проте загальна ситуація в зазначеній сфері із налаштуванням інформаційної системи та її автономізацією не може повною мірою відповідати вимогам Міжнародної організації цивільної авіації (ICAO) та потребам забезпечення ефективності систем автоматизованого пошуку. Автори роботи [2] запропонували ідеологію впровадження сучасних телекомунікаційних мереж та засобів автоматизації в систему проведення авіаційних пошуково-рятувальних заходів у межах Єдиної державної системи цивільного захисту.

У праці [4] описуються методи розрахунків дієвості зразків авіаційної техніки, що залучається для проведення пошуково-рятувальних операцій. У роботах [5, 6] обґрунтовуються способи проведення повітряного пошуку, зокрема візуальний. Якість та ефективність авіаційного пошуку об'єктів, що зазнали аварії, а також час виявлення потерпілих значно залежить від бортових технічних засобів спостереження та розвідки ПРПС. З огляду на це виникає необхідність оцінювання приладів спостереження, а також можливостей бортових засобів зв'язку та телекомунікацій щодо передачі даних із пристроїв і систем спостереження до наземних ПК.

У працях [7–9] проаналізовано різноманітні підходи щодо побудови систем технічного зору, розроблено загальну архітектуру програмного забезпечення для реалізації системи, описані об'єкт автоматизації та типові завдання для систем технічного зору, розглянуто питання збільшення пропускну здатності сенсорних телекомунікаційних мереж.

Автори робіт [10–15] розглянули принципи організації сталого авіаційного й супутникового зв'язку, дослідили технології обміну даними, апаратні

компоненти, програмне забезпечення, варіанти топології побудови систем обміну даними. У праці [11] наведено перспективи побудови бездротових мереж передачі даних в інтересах Збройних сил України.

Аналіз літературних джерел свідчить, що у світі значна увага приділяється розробленню та впровадженню різноманітних систем технічного зору, для передачі даних з яких необхідно застосовувати надійні системи сталого зв'язку: по-перше, короткі хвилі, по-друге, супутниковий зв'язок. Переважно це стосується гелікоптерів поліцейських авіаційних формувань і прикордонної служби, для яких рятувальні операції є лише частиною загального комплексу завдань, а саме спостережень за магістралями, узбережжям і лісовими масивами для запобігання незаконній міграції, обігу наркотиків та інших злочинних дій [16]. На борту вітчизняних вертольотів, що залучаються до пошуково-рятувальних робіт, технічними засобами, за допомогою яких здійснюється пошук потерпілих, використовуються переважно радіотехнічні прилади, іноді тепловізійні. Для передачі даних на ПК рятувальною операцією або в координаційний центр застосовуються радіостанції УКХ-діапазону. Крім того, з Наказу МО України [1] випливає, що вертольоти, залучені як ПРПС, належать до класу середніх транспортних суден. В інших країнах для виконання подібних завдань часто використовуються легкі гелікоптери. Також існують пропозиції щодо залучення для пошуково-рятувальних операцій БПЛА [17, 18]. Згідно із джерелом [18], збільшити радіус пошуку можна з допомогою нової системи БПЛА, що працює за межами прямої видимості (BVLOS) з використанням проміжного "ретрансляційного БПЛА" для забезпечення безперервного зв'язку між наземною станцією та пошуковим БПЛА.

Пропонуємо розглянути можливість залучення для авіаційного пошуку й рятування вітчизняний легкий багатофункціональний гелікоптер Мі-2 (Мі-2МСБ) із вдосконаленим спеціальним обладнанням. Відомо, що для потреб ДСНС України створено пошуково-рятувальну модифікацію цього вертольота шляхом дооснащення пасажирсько-транспортного варіанта Мі-2МСБ пошуковим прожектором і лебідкою.

Отже, **мета статті** – розробити пропозиції щодо вдосконалення складу пошукового обладнання легкого багатофункціонального вертольота типу Мі-2, який може бути залучений як ПРПС для авіаційного пошуку й рятування потерпілих, та розглянути вимоги до засобів передачі інформації

з борту ПРПС на різні наземні сегменти комплексної рятувальної операції (на ПК та наземні рятувальні команди). У питанні організації зв'язку перевага надається саме бездротовим технологіям передачі інформації з борту ПРПС.

Виклад основного матеріалу

У табл. 1 наведено показники гелікоптерів, які вже використовуються для проведення пошуково-рятувальних робіт, зокрема подано характеристики запропонованого легкого вертольота Мі-2МСБ.

На підставі порівняльних характеристик можна зробити висновок, що вертоліт Мі-2 як ПРПС

Таблиця 1.

Пошуково-рятувальне ПС	Рекомендована висота польоту	Рекомендована швидкість польоту, км/год	Варіанти заправлення паливом, кг	Максимальний радіус польоту з 10 % запасом пального, км	Дальність дії АРК-УД, км	Ширина смуги обстеження ΔL, км	Пошукова продуктивність N, км ² /год
Мі-8МТ	500	225	1420	215	15	22,5	5062,5
Мі-14ПС	500	220	2946	410	15	22,5	4950
Ка-27ПС	500	220	2600	470	15	22,5	4950
ЄС-145 "Єврокоптер"	300	220	685	245	АРК відсутній	2 км – поле; 1 км – пересічена місцевість; 0,5 км – ліс	0,7·10 ³
Мі-2МСБ	300	200	1128	290	15	22,5	4500

Значні можливості щодо покращення ефективності авіаційного пошуку за допомогою запропонованого легкого вертольота відкриваються за умови застосування сучасних систем спостереження, а саме IP-камер. Зі свого боку встановлення зазначеного зразка обладнання потребує організації надійного сталого зв'язку для передачі відеоінформації з борту ПРПС на ПК рятувальної операцією.

Мінімальна смуга пропускання потокового відео – 1 Мбіт/с. У разі польотів над Європою, де гарне покриття мережі та велика кількість супутників, можна говорити про можливість передачі потокового відео з незначною тимчасовою затримкою, але не *real-time*. У використанні високих частот, коротких хвиль (це кілобіти за секунду) необхідно враховувати, що сигнал може зникати або загасати на короткий час. Тобто існують певні обмеження щодо передачі відео з носія.

У цьому разі можливо робити запис відео за умови перебування в "сліпій зоні", а потім, коли покращиться зв'язок, передавати його пакетами на землю. Записувати відео необхідно на окремий носій інформації – "жорсткий диск", який має бути

не поступається показниками щодо авіаційного пошуку іншим типам легких суден, навіть закордонним зразкам. Зрозуміло, що середні гелікоптери, які мають паливні баки більшого об'єму, перевершують Мі-2 за радіусом дії. Ширина смуги пошуку та пошукова продуктивність розраховувалися для середньо пересіченої місцевості в районі операції. У разі польоту над гірською та лісною ділянкою ефективність пошукових заходів може зменшуватися в 1,5–2 рази. Розрахунки табл. 1 наведені для варіантів ПРПС із стандартним пошуковим обладнанням.

захищеним від теплових, вібраційних і ударних навантажень (за аналогією з накопичувачем БР-4Т-10 з комплексу бортового аварійно-експлуатаційного реєстратора польотної інформації БУР-4-1-07-01).

Нові можливості передачі відеоінформації з борту повітряного судна з'являються із появою технологій компанії *SpaceX*, а саме мережі *Starlink* [19]. Ще 09 березня 2021 р. засновник компанії *SpaceX* Ілон Маск офіційно підтвердив прагнення вийти на авіаринок. FCC (американська урядова федеральна комісія зі зв'язку) вже надала *SpaceX* дозвіл на проведення випробувань пристроїв для комерційних авіаліній. Цього ж року ВПС США провели випробування можливості *Starlink* в організації комунікацій між винищувачами й наземними службами. Але найбільші зрушення відбуваються в малій авіації у зв'язку з відносно низькою вартістю комплексу обладнання *Starlink* (для стаціонарної установки – 499 \$).

Зараз на легкомоторному літаку важко користуватися супутниковим телефоном. Зв'язок із землею відбувається через звичайну рацію, як і сто років тому. Термінал *Starlink* дає змогу передавати не лише голос пілота та телеметрію,

а й відео високої чіткості в режимі реального часу. За словами віцепрезидента з розвитку *Starlink* та комерційних продажів Джонатана Хофеллера, конструкція авіаційних антен не сильно відрізнятиметься від стаціонарних наземних. Інженери лише доопрацюють їх з урахуванням польотної особливості. Розробленням, виробництвом та продажами авіаційних терміналів займатиметься також *SpaceX*.

На рис. 1, 2 наведені схеми системи організації зв'язку для передачі даних спостереження з борту пошуково-рятувального вертольоту типу *Mi-2*.

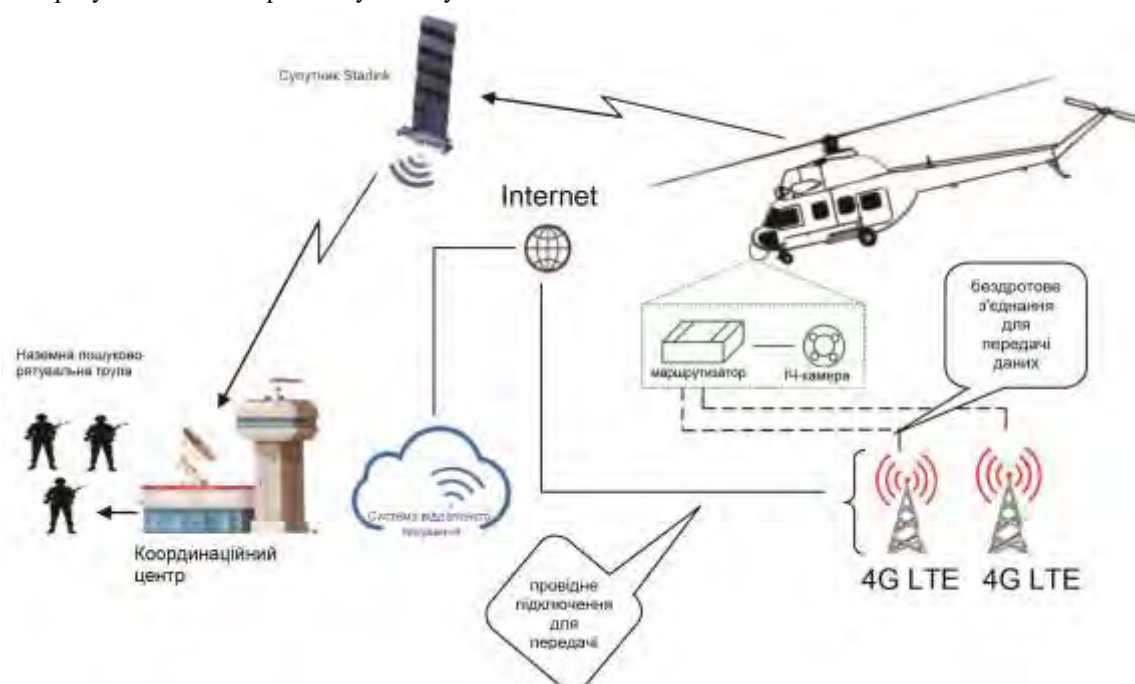


Рис. 1. Схема системи організації зв'язку ПРПС із наземними абонентами (перший варіант)

До апаратних компонентів системи належать такі вимоги:

- маршрутизатор має відповідати категорії LTE Cat 4 зі швидкістю передачі інформації до 150 Мбіт/с, що достатньо для передачі семи потоків 1080p30 CCTV;

- підключення має бути вдосконалено завдяки двом SIM-карткам із функцією автоматичного підключення на доступний запасний канал зв'язку, який забезпечить для керівництва пошуково-рятувальної операції передачу даних CCTV навіть у разі, якщо основний оператор стає недоступним унаслідок різких змін висоти;

- дистанційне управління або система віддаленого керування має забезпечувати автоматичне оновлення мікропрограм маршрутизатора та надійне управління ним, а також камерою.

У першому варіанті (рис. 1) спостереження за поверхнею, над якою виконується політ, забезпечується завдяки IP-камері, підключеній до промислового стільникового маршрутизатора за допомогою інтерфейсу *Ethernet*. Маршрутизатор використовує зв'язок 4G LTE для передачі зображень із камери спостереження по 4G LTE до ПК рятувальною операцією або координаційного центру. Передбачена можливість дистанційно управляти маршрутизатором і камерою із землі за допомогою системи дистанційного керування.

Паралельно передачу результатів повітряного пошуку з борту ПРПС можливо організувати через супутник-ретранслятор системи *Starlink*.

Відповідно до схеми передачі даних, зображеної на рис. 2, вертоліт, що задіяний у рятувальній операції як ПРПС, є своєрідним повітряним ПК для БПЛА та дронів із датчиками для пошуку місць аварії ПС і потерпілих. Запропонована система забезпечуватиме безперервні потоки даних спостереження та керування між "пошуковими" БПЛА та наземним або повітряним ПК. У ролі останнього передбачається застосовувати вертоліт. Така схема дасть змогу керівництву пошуково-рятувальної операції оновлювати стратегії пошуку дуже динамічно.

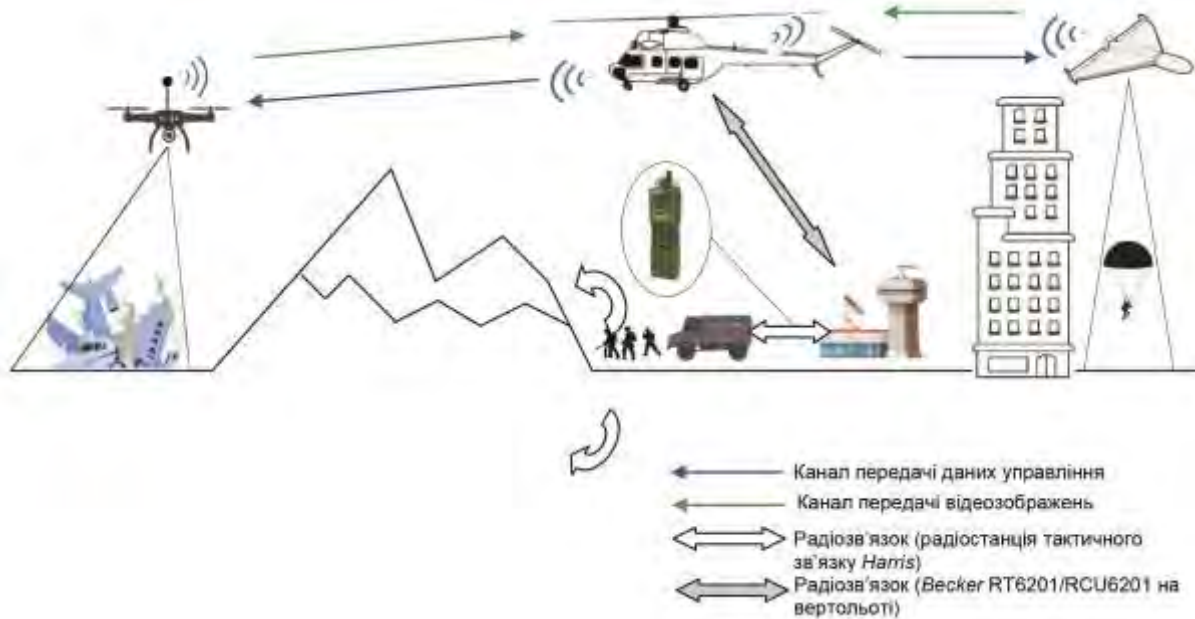


Рис. 2. Схема системи організації зв'язку ПРПС з іншими абонентами (другий варіант)

Компанія *Boeing* [20, 21] розпочала випуск модернізованого варіанта ударного вертольота AH-64D Block III ще 2011 р. Ця модифікація здатна керувати польотами, передавати відеопотік і супровідні метадані в реальному часі від чотирьох типів безпілотних ЛА (*Hunter, Raven, Reaper* та *Shadow B*), що також підвищило бойові можливості вертольота. Усі зміни передбачається додати на основі випробуваних технологій: OSRVT MUMT-2 і VUIT-2. Рівень сумісності LOI-4 дає змогу переглядати відео з камери БПЛА, контролювати його корисне навантаження, впливати на траєкторію польоту в конкретних ситуаціях. Передбачуваний остаточний ступінь – рівень 5 (LOI-5), після чого *Apache* матиме повний контроль БПЛА на всіх етапах польоту, зокрема під час зльоту й посадки. Окрім покращеного радару управління вогнем (FCR), оновлення стосуються процесора для виявлення цілей, системи тактичного управління передачею даних (TCDL), датчика метеорологічних умов (IMC), пункту керування БПЛА. Гелікоптер AH-64D *Apache Block III L 4* не є першим американським гелікоптером архітектури відкритої системи. Уже є ПС гелікоптери CH-47F *Cargo* та MH-47G *Special Operations Chinooks* із загальною системою архітектури (CAAS), що може об'єднуватися із системою *Apache*.

Контроль і безпосереднє керування з борту вертольота дронами, спроможність отримувати

інформацію в реальному часі значно розширюють можливості ПРПС у зазначених нижче напрямках.

– Доступ до БПЛА дасть змогу бортовим операторам вертольота бачити більше зон у районі пошуку. Бортові оператори отримують одночасно як відеозображення поверхні, над якою пролітає повітряне судно, так і картинку земної поверхні, яку знімає апаратура БПЛА, що віддалена від ПС. Тобто йдеться про так званий "мультизір".

– Огляд району пошуку здійснюватиметься під різними кутами зору, як з борту вертольота – візуально або за допомогою власних технічних засобів, так і з БПЛА. Якщо спостереження за місцевістю ускладнюється особливостями рельєфу або забудови (рис. 2), то об'єкти пошуку можуть бути приховані від огляду з гелікоптера. Однак спрямувавши БПЛА по траєкторії (маршруту), що дозволяє бачити об'єкти пошуку за перешкодою, бортовий оператор ніби "переносить" свої датчики на інший бік, залишаючись на місці. Потім, отримавши доступ до відеоканалу від камер БПЛА, оператор може бачити інші ділянки місцевості, що оглядаються з метою виявлення потерпілих. Необхідно зазначити, що цей процес відбувається в режимі реального часу.

– ПРПС зможе прийняти відеокартинку від БПЛА й відправити її іншим елементам платформи, що беруть участь у пошуково-рятувальній операції (до координаційного центру або наземної рятувальної команди за наявності в останньої відповідної апаратури).

Висновки

Реалізація запропонованих рішень спонукає до розгляду функціональних обов'язків учасників авіаційного пошуку й рятування, особливо бортових операторів. До зазначених обов'язків необхідно додати функції щодо керування додатковими технічними засобами, за допомогою яких відбуватиметься пошук та виявлення ЛА, що зазнали аварії, та засобів передачі даних, тобто пристроїв та систем зв'язку.

Удосконалення бортового обладнання ПРПС запропонованими системами технічного зору разом з організацією надійного каналу передачі відеоінформації скоротить час пошуку повітряного судна, що зазнало аварії, і потерпілих. Ефективність авіаційного пошуку значно підвищиться завдяки застосуванню розглянутих технічних рішень, особливо в разі проведення операції в нічний час, а також за умов обмеженої видимості внаслідок задимлення або туману.

Список літератури

1. Наказ МО України від 29.12.2016 № 736 "Про затвердження Правил пошуково-рятувального забезпечення польотів державної авіації України" (Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 08 лютого 2017 р. за № 175/30043).
2. Gurnyk A., Chumachenko S., Kirchu P., Valuiskyi S., Uryadnikova I., Lysenko O., Semenchenko A. Multi-purpose system of telecommunication networks and automation for aircraft works in search and rescue. *Medzinárodného vedeckého seminára Akadémia ozbrojených sil gen. M. R. Štefánika "Riadenie bezpečnosti zložitých systémov 2013"*. Bratislava, Slovensko. 18–22. Februára 2013. P. 131–137.
3. Козловський В. О., Гурник А. В., Шабала В. І. Аналіз функціонування авіаційного пошуку та рятування в Україні із застосуванням системного підходу. *Науковий вісник Академії муніципального управління. Серія: Техніка*. 2012. № 5. С. 39–47. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvamu_teh_2012_5_7
4. Рогозін А.С., Гурник А.В. Методи розрахунків дієвості авіації для пошуково-рятувальних робіт у надзвичайних ситуаціях. *Збірник матеріалів міжнародної науково-практичної конференції "Проблеми цивільного захисту: управління, попередження, аварійно-рятувальні та спеціальні роботи"*. 2014. С. 151–154.
5. Gurnyk A.V. To the issue of conducting aviation works with visual search. *Scientific Bulletin of UkrNDIPB*. 2015. №1 (31). P. 99–109. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvundipb_2015_1_14
6. Хижняк В. В., Гурник А. В. Вибір доцільного способу пошуку об'єкта на основі оптимального розподілу сил і засобів пошуку і рятування. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2014. № 4. С. 96–99. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nitps_2014_4_22
7. Lysenko O., Valuiskyi S. Capacity increasing of sensor telecommunication networks. *Information and Telecommunication Sciences*. 2012. № 1. P. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.20535/2411-2976.12012.%25p>
8. Котвицький Р. С., Сарибіга Г. В., Збруцький О. В. Метод визначення координат рухомого об'єкту з використанням системи технічного зору. *Інформаційні системи, механіка та керування*. 2017. № 16. С. 71–78. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ismk_2017_16_10
9. Котвицький Р. С., Сарибіга Г. В., Збруцький О. В. Автоматичне керування оптичною віссю камери на основі системи технічного зору з використанням методу ідентифікації об'єктів за кольором. *Інформаційні системи, механіка та керування*. 2015. № 13. С. 111–115. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ismk_2015_13_14
10. Тимочко О. І., Афанасьєв В. В., Афанасьєв Ю. В., Аросланкін О. О. Модель системи позиціонування та моніторингу на основі багаторівневої структури передачі даних в розподіленій мережі. *Системи озброєння і військова техніка*. 2021. № 4 (68). С. 123–129. DOI: 10.30748/soivt.2021.68.16
11. Жовноватюк Р. М., Канкін І. О., Умінський В. В. Перспективи побудови бездротових мереж передачі даних в інтересах Збройних Сил України. *Вісник ЖДТУ. Серія "Технічні науки"*. 2010. № 4 (55). С. 39–47.
12. Харченко В., Барабанов Ю., Греков А. Моделирование спутникового авиационного зв'язку. *Advances in aerospace technology*. Т. 50. № 1. 2012. С. 5–13. DOI: <https://doi.org/10.18372/2306-1472.50.105>
13. Князєв В. В., Лазуренко Б. О., Серков О. А. Методи і засоби оцінки рівня завадостійкості безпроводних каналів зв'язку. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2022. № 1(19). С. 92–98. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.19.092>
14. Ruban I., Kuchuk H., Kovalenko A. Redistribution of base stations load in mobile communication networks. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. Kharkiv. 2017. No. 1 (1). P. 75–81. DOI:10.30837/2522-9818.2017.1.075
15. Калашник Г. А., Калашник-Рибалко М. А. Основні заходи щодо забезпечення ефективного функціонування систем управління, зв'язку та навігації в умовах впливу деструктивних геліогеофізичних збурень. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2018. № 1. С. 92–98. DOI: 10.30748/nitps.2018.30.13
16. Connected surveillance in Cyprus police helicopters. URL: <https://teltonika-networks.com/industries/use-cases/connected-surveillance-in-cyprus-police-helicopters/> (дата звернення 18.02.2023).
17. Militaru G., Popescu D. and Ichim L. UAV-to-UAV Communication Options for Civilian Applications. *26th Telecommunications Forum (TELFOR)*. Belgrade, Serbia. 2018. P. 1–4. DOI: 10.1109/TELFOR.2018.8612108

18. Beyond Visual Line of Sight Operations. URL: <https://sites.uw.edu/afsl/research/> (дата звернення 18.02.2023).
19. Starlink courting airlines for in-flight Internet connectivity deals. URL: <https://www.lightreading.com/satellite/starlink-courting-airlines-for-in-flight-internet-connectivity-deals/a/d-id/770117> (дата звернення 28.02.2023).
20. AH-64 APACHE – Lifesaver at Work. URL: <http://www.miltechmag.com/2014/06/ah-64-apache-lifesaver-at-work.html> (дата звернення 28.02.2023).
21. Boeing AH-64D Apache Block III Demonstrates Level IV UAS Control. URL: <https://boeing.mediaroom.com/2009-06-23-Boeing-AH-64D-Apache-Block-III-Demonstrates-Level-IV-UAS-Control> (дата звернення 28.02.2023).

References

1. "Order of the Ministry of Defense of Ukraine dated 29.12.2016 No. 736 "On approval of the Rules for search and rescue support of flights the state aviation of Ukraine" ["Nakaz MO Ukraїni ot 29.12.2016 № 736 «Pro utverzhdeniye Pravil poshukovo-rituval'nogo zabezopasnogo pitaniya derzhavnoy aviatsii Ukraїni»"].
2. Gurnyk, A. (2013), "Multi-purpose system of telecommunication networks and automation for aircraft works in search and rescue", *Medzinárodného vedeckého seminára Akadémia ozbrojených síl gen. M. R. Štefánika «Riadenie bezpečnosti zložitých systémov 2013»*, Bratislava, Slovensko. 18–22. februára 2013. P. 131–137.
3. Kozlovskiy, V., Gurnyk, A., Shabala, V. (2012), "Analysis of the functioning of aviation search and rescue in Ukraine using a systemic approach". *Scientific Bulletin of the Academy of Municipal Administration. Series: Technics*, (5). P. 39–47. available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvamu_teh_2012_5_7
4. Rogozin, A., Gurnyk, A. (2014), "Methods of calculating the effectiveness of aviation for search and rescue operations in emergency situations", *Collection of materials of the international scientific and practical conference*, P. 151–154, available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvundipb_2015_1_14
5. Gurnyk, A. V. (2015), "To the issue of conducting aviation works with visual search", *Scientific Bulletin of UkrNDIPB*, №1 (31). P. 99–109, available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvundipb_2015_1_14
6. Khizhnyak V., Gurnyk A. (2014), "Selection of an expedient method of searching for an object based on the optimal distribution of forces and means of search and rescue", *Science and technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*, No. 4. P. 96–99, available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nitps_2014_4_22.
7. Lysenko, O., Valuiskeyi, S. (2012), "Capacity increasing of sensor telecommunication networks", *Information and Telecommunication Sciences*, No. 1. P. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.20535/2411-2976.12012.%25p>
8. Kotvytskyi, R., Sariboga, G., Zbrutskyi, O. (2017), "The method of determining the coordinates of a moving object using a technical vision system", *Information systems, mechanics and control*, (16). P. 71–78, available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ismk_2017_16_10.
9. Kotvytskyi, R., Sariboga, G., Zbrutskyi, O. (2015), "Automatic control of the optical axis of the camera based on the technical vision system using the method of object identification by color", *Information systems, mechanics and control*, (13), 111–115, available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ismk_2015_13_14.
10. Tymochko, O., Afanasyev, V., Afanasyev, Yu., Aroslankin, O. (2021), A model of the positioning and monitoring system based on a multi-level data transmission structure in a distributed network", *Weapons systems and military equipment*, (4 (68)), 123–129. DOI: 10.30748/soivt.2021.68.16
11. Zhovnovatyuk, R., Kankin, I., Uminsky, V. (2010), "Prospects of building wireless data transmission networks in the interests of the Armed Forces of Ukraine", *Bulletin of ZHTU. Series "Technical Sciences"*, (4 (55)). P. 39–47.
12. Kharchenko, V., Barabanov, Yu., Grekov, A. (2012), "Modeling of aviation satellite communication", *Advances in aerospace technology*, 50 (1), 5–13. DOI: <https://doi.org/10.18372/2306-1472.50.105>
13. Knyazev, V., Lazurenko, B., Serkov, O., (2022), "Metody i sredstva otsenki urovnya pomekhoustoychivosti besprovodnykh kanalov svyazi", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, 1(19). P. 92–98. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.19.092>
14. Ruban, I., Kuchuk, H., Kovalenko, A. (2017), "Redistribution of base stations load in mobile communication networks", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, 1(1). P. 75–81. DOI:10.30837/2522-9818.2017.1.075
15. Kalashnyk, G., Kalashnyk-Rybalko, M. (2018), "The main measures to ensure the effective functioning of control, communication and navigation systems under the influence of destructive heliogeophysical disturbances", *Science and technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*, (1). P. 92–98. DOI: 10.30748/nitps.2018.30.13
16. Connected surveillance in Cyprus police helicopters, available at: <https://teltonika-networks.com/industries/use-cases/connected-surveillance-in-cyprus-police-helicopters/> (last accessed 18.02.2023).
17. Militaru, G., Popescu, D. and Ichim, L. (2018) "UAV-to-UAV Communication Options for Civilian Applications", *26th Telecommunications Forum (TELFOR)*, Belgrade, Serbia. P. 1–4. DOI: 10.1109/TELFOR.2018.8612108.
18. Beyond Visual Line of Sight Operations, available at: <https://sites.uw.edu/afsl/research/> (last accessed 18.02.2023).
19. Starlink courting airlines for in-flight Internet connectivity deals, available at: <https://www.lightreading.com/satellite/starlink-courting-airlines-for-in-flight-internet-connectivity-deals/a/d-id/770117> (last accessed 28.02.2023).
20. AH-64 APACHE–Lifesaver at Work. available at: <http://www.miltechmag.com/2014/06/ah-64-apache-lifesaver-at-work.html> (last accessed 28.02.2023).

21. Boeing AH-64D Apache Block III Demonstrates Level IV UAS Control. available at: <https://boeing.mediaroom.com/2009-06-23-Boeing-AH-64D-Apache-Block-III-Demonstrates-Level-IV-UAS-Control> (last accessed 28.02.2023).

Received 16.05.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Клімішен Олексій Олегович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, старший викладач кафедри авіаційного обладнання та комплексів повітряної розвідки, Харків, Україна; e-mail: kl_s_kh@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3859-1531>

Красноручський Андрій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, доцент кафедри радіоелектронного обладнання літальних апаратів, Харків, Україна; e-mail: krasnorycki@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4318-2217>

Кочук Сергій Борисович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського ("ХАІ"), доцент кафедри електротехніки та мехатроніки, Харків, Україна; e-mail: s.kochuk@khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1429-2246>

Klimishen Oleksii – PhD (Technical Sciences), Senior Research, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Forces University, Senior Lecturer aviation equipment and air reconnaissance systems, Kharkiv, Ukraine.

Krasnorutskiyi Andrii – PhD (Technical Sciences), Associated Professor, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Forces University, Associated Professor at the Department of radio electronic equipment of aircraft, Kharkiv, Ukraine.

Kochuk Serhii – PhD (Technical Sciences), Associated Professor, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Associated Professor at the Department of Mechatronics and Electrical Engineering, Kharkiv, Ukraine.

APPLICATION OF WIRELESS COMMUNICATION AND TECHNICAL VISION TECHNOLOGIES TO IMPROVE AVIATION SEARCH AND RESCUE OPERATIONS

The subject of research in the article is approaches to improving the onboard equipment of a search and rescue aircraft (AC). The **purpose** of the study is to develop proposals for improving the technical means of searching for aircraft that have suffered an accident, namely video surveillance systems and information transmission to the control centers (CC) of the search and rescue operation, based on the analysis of the Rules for Search and Rescue Support of Flights of the State Aviation of Ukraine and foreign experience in search and rescue operations. It is proposed to use a light multipurpose helicopter of the Mi-2 type as a search and rescue aircraft (SRAC). The work solves the following **problems**: studying modern approaches to ensuring aviation search and rescue operations; analyzing technical means of ensuring the search for crashed aircraft; developing proposals for a method of transmitting information from the airborne control center to the ground control center; selecting a suitable carrier for special equipment and individual samples of video surveillance and data transmission systems. The **method** of comparative analysis is used to solve partial problems. The following **results** have been obtained: the requirements for the search characteristics of SRAC are determined, in particular, it is proposed to use a light multipurpose helicopter as SRAC; a scheme for organizing communication with the search operation control center using wireless communication technologies is presented; specific requirements for individual components of SRAC onboard special equipment are formulated. **Conclusions.** The introduction of wireless communication technologies together with thermal imaging equipment will increase the speed and efficiency of searching for crashed aircraft, especially at night and in conditions of limited visibility (fog, smoke). In addition, the range of tasks of light helicopters such as the Mi-2 is expanding, and the number of both onboard and ground operators directly using thermal imaging equipment (infrared camera) to determine the location of the crash is increasing. In this case, the total number of personnel involved in search and rescue operations is not affected.

Keywords: aviation search and rescue; wireless communication technologies; data transmission; equipment components; technical vision; search and rescue aircraft.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Клімішен О. О., Красноручський А. О., Кочук С. Б. Застосування технологій бездротового зв'язку й технічного зору для вдосконалення авіаційних операцій пошуку та рятування. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 2 (24). С. 72–79. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.072>

Klimishen, O., Krasnorutskiyi, A., Kochuk, S. (2023), "Application of wireless communication and technical vision technologies to improve aviation search and rescue operations", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (24), P. 72–79. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.072>

Є. Корнієнко, О. Ляшенко, А. Торба

МЕТОД КЕРУВАННЯ СИСТЕМОЮ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ БЕЗДРОТОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Актуальність. У сучасних умовах питання енергоефективності та використання альтернативних джерел енергії є актуальними й важливими. Зокрема сонячна енергетика є однією з найбільш перспективних галузей у вирішенні цих проблем. Для оптимального застосування сонячної енергії потрібно контролювати й керувати процесом генерації. Необхідний метод, який би керував системою генерації електроенергії з використанням бездротових технологій та мав гнучкі режими роботи. Створення методу ефективного пошуку точки максимальної потужності та системи генерації електроенергії загалом є основним завданням статті. **Мета роботи** – дослідити та розробити метод керування системою генерації електроенергії з використанням бездротових технологій. **Предметом дослідження** є метод керування та контролю системи генерації електроенергії. **Об'єктом** є процес керування та контролю системи генерації електроенергії. **Методи дослідження** – це методи роботи сонячної панелі за умови максимальної потужності: PWM (*Pulse Width Modulation*) та MPPT (*Maximum Power Point Tracking*). **Результати роботи.** У статті запропоновано метод керування системою генерації електроенергії з використанням бездротових технологій. Для генерації електроенергії обрано сонячну панель і генератор. Контроль генерації та функціонування системи базується на роботі мікроконтролера, що передає поточні дані та може контролювати систему мобільного застосування через Wi-Fi-модуль. Зазначений метод може бути використаний у "Розумному будинку" та інших системах, спрямованих на стале енергоживлення споживачів. **Висновок.** Розроблений метод керування системою генерації електроенергії планується застосовувати в подальшому в системах сталого живлення споживачів. Надалі метод може бути вдосконалений унаслідок інтеграції з іншими бездротовими технологіями та додавання інших об'єктів генерації електроенергії.

Ключові слова: система генерації електроенергії; бездротові технології; мікроконтролер; мобільний застосунок; інвертор; точка максимальної напруги; MPPT; PWM.

Вступ

Сучасний світ потребує постійного зростання генерації електроенергії, що зумовлено збільшенням населення та поширенням різноманітних електричних пристроїв. До того ж одним із найважливіших напрямів розвитку енергетики є використання відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної. Однак для ефективного та стабільного функціонування систем генерації електроенергії на основі сонячних панелей необхідно розробити високоефективні та стабільні методи керування й моніторингу [1–3]. У статті запропоновано стабільну систему генерації електроенергії, що має на меті забезпечити споживача стабільним доступом до електроенергії. Для вирішення завдання розроблено систему з чотирма джерелами електроенергії: сонячна панель, генератор, електромережа та акумулятори.

Аналіз наявних рішень показав [4, 5], що для роботи сонячної панелі за максимальної потужності в певних умовах застосовуються такі підходи:

1) PWM (*Pulse Width Modulation*) – принцип, відповідно до якого береться напруга в точці максимальної потужності для сонячної панелі,

і система підтримує цю напругу протягом роботи генерації. Недоліком такого підходу є зміна напруги в точці максимальної потужності залежно від умов освітленості, температури тощо;

2) MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) – спосіб отримання максимально можливої потужності на виході фотомодулів, принцип якого полягає в постійному скануванні потужності в точці біля точки максимальної потужності. Недоліком є коливання потужності під час сканування, що зменшує генерацію сумарної потужності.

Постановка проблеми

PWM- та MPPT-методи мають недоліки, тому постає проблема сталого функціонування системи та розроблення методу роботи сонячної панелі за максимальної потужності. Необхідно обрати й дослідити метод, що має мінімізувати вищезазначені проблеми й недоліки наявних рішень.

Для забезпечення контролю та моніторингу системи обрано мікроконтролер PIC версії 16f18877, що має перевагу серед інших, а саме наявність великої кількості апаратних модулів, зокрема:

типу акумулятора існують різні алгоритми заряду. Так, наприклад, для заряджання літєвих акумуляторів не використовується "буферний" режим, бо він призводить до зменшення циклів заряду й розряду. Тому для цього типу акумуляторів застосовується принцип повного відключення від заряду в разі повного заряду. Друга відмінність полягає в різниці струмів заряду. Так, наприклад, для кислотних типів акумуляторів вважається номінальним 0,1 С (ємності акумуляторів), а для літєвих – 0,5 ... 1 С. Кислотні акумулятори (або свинцево-кислотні) мають нижчу швидкість заряду, порівняно з літєвими акумуляторами.



Рис. 2. Схема з'єднання акумулятора й ланки постійного струму

3) Коректор коефіцієнта потужності (присєднання до електромережі) переводить змінний струм на постійний [11]. Схема також має містити функціонал АВР (автоматичного введення резерву), сигнал на який подається з мікроконтролера, у разі малої залишкової ємності на акумуляторі, за відсутності напруги в електромережі, недостатньої освітленості та малої залишкової ємності в акумуляторі.

4) Перетворювач – інвертор [12], що переводить постійний струм з ланки постійного струму в змінний до споживачів.

5) Перетворювач із постійного струму до змінного. Розташований між ланкою постійного струму та мережею. Живить мережу в разі надлишкової виробленої електроенергії.

6) Коректор коефіцієнта потужності (PFC). Розміщується між ланкою мережі та ланкою постійного струму. Переводить змінний струм з мережі до постійного струму (400 В). Аналізуючи подібні коректори, робимо висновок, що напруга не завжди буде 400 В, можливі коливання 390–400 В. Саме це необхідно мати на увазі в процесі проектування робочої схеми (рис. 3).



Рис. 3. Схема з'єднання мережі та ланки постійного струму

Дистанційний контроль та моніторинг системи генерації електроенергії може виконуватися з пульта управління, але цей підхід не є оптимальним і має недоліки.

1) Установлення. Дротові системи потребують більш складного й трудомісткого процесу встановлення, оскільки необхідно прокласти кабелі між різними компонентами системи. Це може збільшити вартість і час встановлення.

2) Обмеження в розміщенні. У деяких випадках дротові системи контролю та моніторингу обмежують можливості розміщення обладнання через необхідність прокладання кабелів. Це може вплинути на гнучкість і оптимальність розміщення компонентів системи.

3) Надійність. Дротові системи схильні до переривання зв'язку через пошкодження кабелів, корозію, "втому" матеріалів або поганий контакт між компонентами. Це впливатиме на надійність і стабільність системи.

4) Естетика. Відкриті кабелі створюють проблеми з естетикою та безпекою, особливо в приватних будинках або комерційних приміщеннях, де зовнішній вигляд є важливим.

5) Масштабованість. Додавання або заміна компонентів у дротових системах може потребувати додаткових зусиль і витрат на модифікацію або прокладання нових кабелів. Тому бездротові системи

контролю та моніторингу зазвичай пропонують кращу масштабованість і гнучкість.

б) Вартість. Залежно від обсягу проєкту та компонентів системи, дротові технології можуть мати вищу вартість, пов'язану з кабелями та встановленням.

Зважаючи на недоліки дротових систем контролю та моніторингу, бездротові технології, такі як *Wi-Fi* та *Bluetooth*, стають дедалі більш привабливими в контексті контролю системи генерації електроенергії [13, 14]. Вони забезпечують більш гнучке, надійне та легкомасштабоване рішення для моніторингу й керування системами генерації електроенергії на основі сонячних панелей та інших відновлюваних джерел.

Крім того, бездротові технології забезпечують зручність і швидкість передачі даних у режимі реального часу, що дає змогу операторам системи миттєво відстежувати стан обладнання, вирішувати проблеми та здійснювати оптимальне керування.

Застосування бездротових технологій також відкриває нові можливості для інтеграції з іншими "розумними" пристроями та системами, завдяки чому створюються більш "розумні" та автоматизовані системи енергозабезпечення. Наприклад, можна інтегрувати контроль і моніторинг сонячної панелі із системою "Розумний будинок" або використовувати мобільні застосунки для віддаленого керування та спостереження [15].

Бездротові технології, такі як *Wi-Fi* та *Bluetooth*, мають низку переваг порівняно з дротовими технологіями в контексті контролю системи генерації електроенергії.



Рис. 4. Схема з'єднання мікроконтролера й мобільного застосунку

Комунікація здійснюється через програмну шину UART, що є одним із способів передачі даних. Ця шина передає інформацію в асинхронному режимі, що означає, що він не потребує окремого сигналу тактової частоти для синхронізації передачі та прийому інформації. Для коректної передачі даних потрібно налаштувати параметри програмної шини.

1) Гнучкість і мобільність. Бездротові технології дають змогу контролювати систему з будь-якої точки з покриттям сигналом. Завдяки цьому легко моніторити та керувати системою на відстані без потреби встановлення додаткових кабелів.

2) Більший радіус дії (для *Wi-Fi*). *Wi-Fi* забезпечує більший радіус дії порівняно з *Bluetooth* і дротовими з'єднаннями, що дає змогу контролювати й моніторити систему на більшій відстані.

3) Зручність. Бездротові технології забезпечують простий і зручний доступ до системи контролю та моніторингу з допомогою мобільних пристроїв, зокрема смартфонів і планшетів.

4) Швидкість та ефективність. Бездротові технології, такі як *Wi-Fi*, забезпечують високу швидкість передачі даних, що сприяє швидшому оновленню інформації та реагуванню на зміни в системі.

5) Віддалений доступ. Завдяки інтеграції з інтернетом бездротові технології дають змогу користувачам контролювати й моніторити систему навіть на відстані, забезпечуючи зручність і вчасність управління.

б) Зниження витрат на інфраструктуру. Відсутність необхідності в прокладанні кабелів знижує витрати на встановлення та підтримку системи контролю й моніторингу.

Отже, за переліченими вище факторами комунікація між мікроконтролером і мобільним пристроєм виконується за допомогою *Wi-Fi*-модуля (рис. 4). Для комунікації застосовується модуль ESP8266-ESP-12S.

Загальне поєднання елементів (рис. 5) робить систему гнучкою, контрольованою та вирішує поставлене завдання.

Проаналізовані підходи з отримання максимальної потужності показали, що кожен із методів має недоліки. Вирішення завдання полягає в поєднанні двох методів для мінімізації недоліків кожного з них.

MPPT – це контролер, що слідкує за точкою максимуму потужності в певних умовах. Пошук точки максимальної потужності на сонячній батареї

необхідний для оптимальної роботи сонячної електростанції та забезпечення максимального коефіцієнта корисної дії.

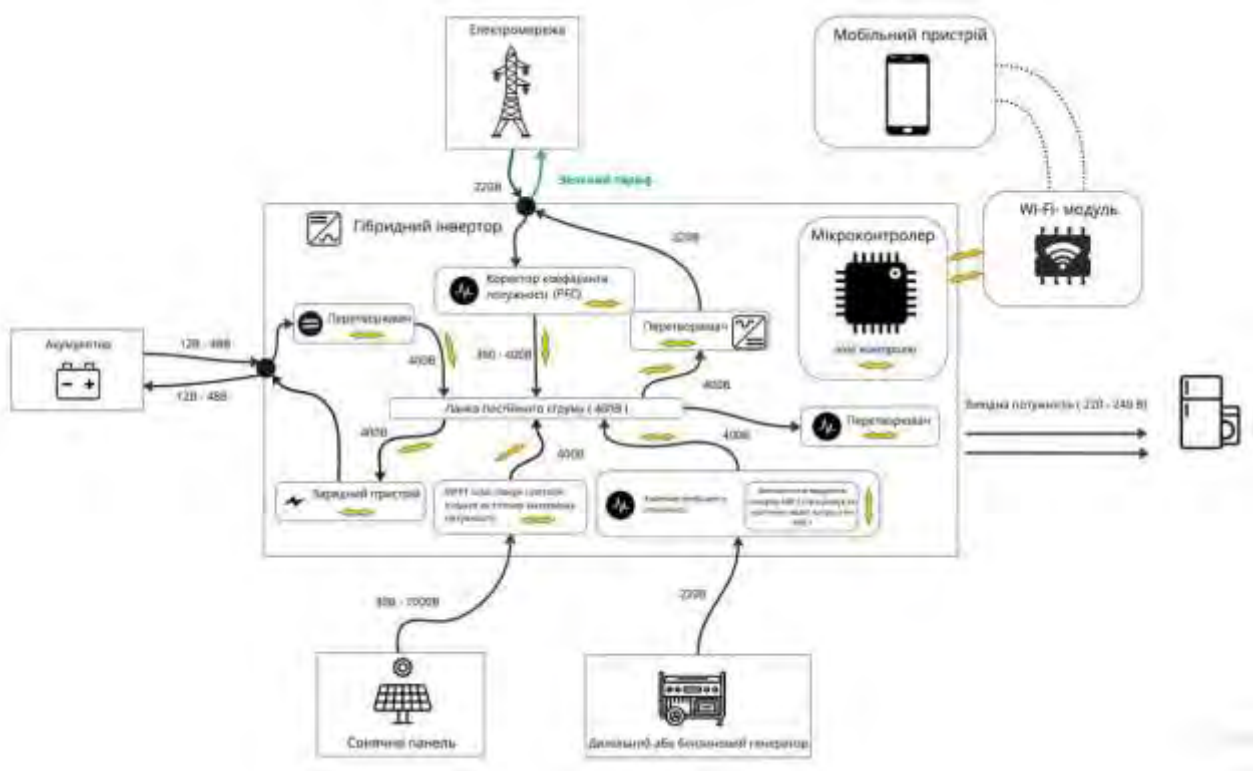


Рис. 5. Загальна схема функціонування системи

Пошук точки максимальної потужності дає змогу:

- 1) оптимізувати роботу сонячної батареї за різних погодних умов і впродовж усього дня;
- 2) забезпечити найвищу енергетичну продуктивність сонячної батареї;
- 3) зменшити втрати енергії внаслідок коливань умов освітлення й температури.

Для того, щоб знайти точку максимальної потужності за визначених умов, було проведено дослідження. Мета експерименту досягалася завдяки зміні спротиву навантаження. Для цього була побудована електрична схема (рис. 6), що давала змогу мікроконтролеру зчитувати поточні дані напруги та струму й миттєво порахувати потужність.

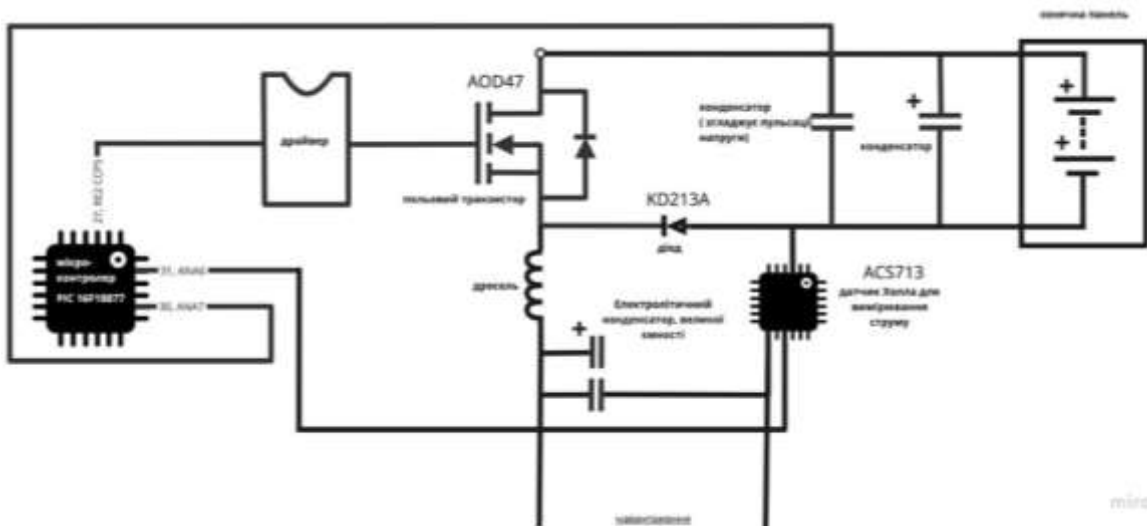


Рис. 6. Електрична схема для пошуку точки максимальної потужності

Обрана сонячна панель має кілька характеристик, що перелічені в табл. 1.

Таблиця 1. Технічні характеристики сонячної панелі

Технічні характеристики сонячної панелі	
Номинальна потужність (W), Вт	10
Напруга холостого ходу (V), В	21,52
Струм короткого замикання (I), А	0,66
Максимальна напруга за умови W, V	17,5
Максимальний струм за умови W, A	0,6
ККД, %	21

Збільшення струму від нуля до струму короткого замикання відбувається завдяки керуванню з мікроконтролера роботою польового транзистора. Мікроконтролер регулює шпаруватість імпульсів на транзисторі, унаслідок чого зменшується напруга з напруги холостого ходу до нуля, та збільшується струм з нуля до струму короткого замикання. За результатами дослідження побудовано залежність потужності від струму (рис. 7).

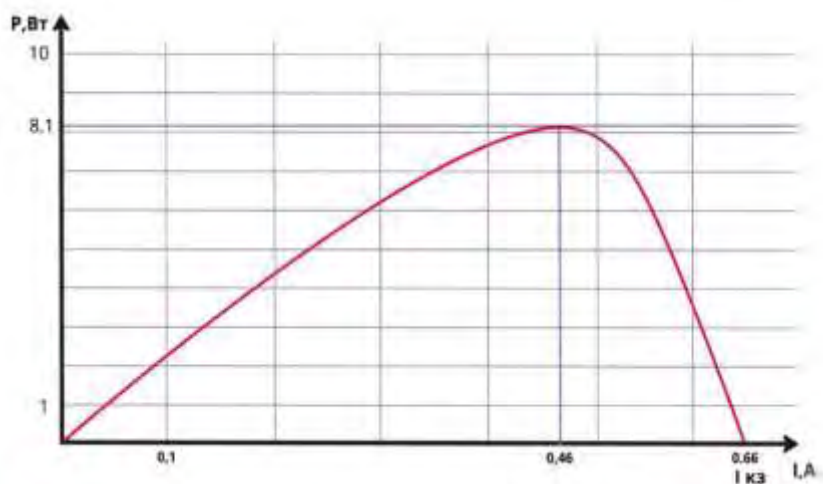


Рис. 7. Графік залежності потужності від струму

Експеримент показав найбільшу потужність у точці 8,1 Вт за умови струму 0,46 А, що є на графіку точкою екстремуму. Точка екстремуму тільки одна. Якщо точка одна, то алгоритм пошуку максимальної потужності відбувається шляхом найпростішого порівняння двох сусідніх вимірювань (рис. 8).

Обрання частоти ШІМ (широтно-імпульсної модуляції) відбувалося на підставі таких чинників:

- 1) частота не є меншою за 20 кГц (звукова частота);
- 2) що вища частота, то більші динамічні втрати на польовому транзисторі;
- 3) що вища частота, то менша індуктивність дроселя необхідна.

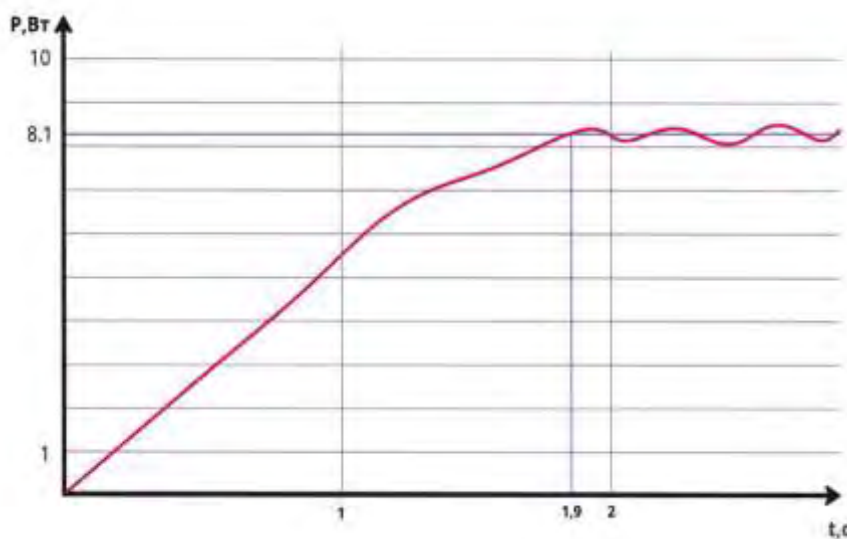


Рис. 8. Графік залежності потужності від часу в процесі пошуку точки максимальної потужності

На підставі цих чинників обрано частоту 24 кГц. Період коливань є величиною, зворотною до частоти коливань. Тому період дорівнює $1/24000 = 0,0000416 \text{ с} = 41,6 \text{ }\mu\text{s}$. Ширина імпульсу

обчислюється за формулою $\frac{T}{100} \times n$, де T – період; n – шпаруватість у відсотках. За цими розрахунками була побудована таблиця широтно-імпульсної модуляції в умовах різної шпаруватості (рис. 9).



Рис. 9. Таблиця ШІМ в умовах різної шпаруватості

Також у межах роботи досліджено вплив освітлення на напругу й точку максимальної потужності. За результатами вимірювань з'ясовано:

що менша освітленість, то менша точка максимальної потужності, а напруга коливається в незначному діапазоні, порівняно зі струмом (рис. 10).

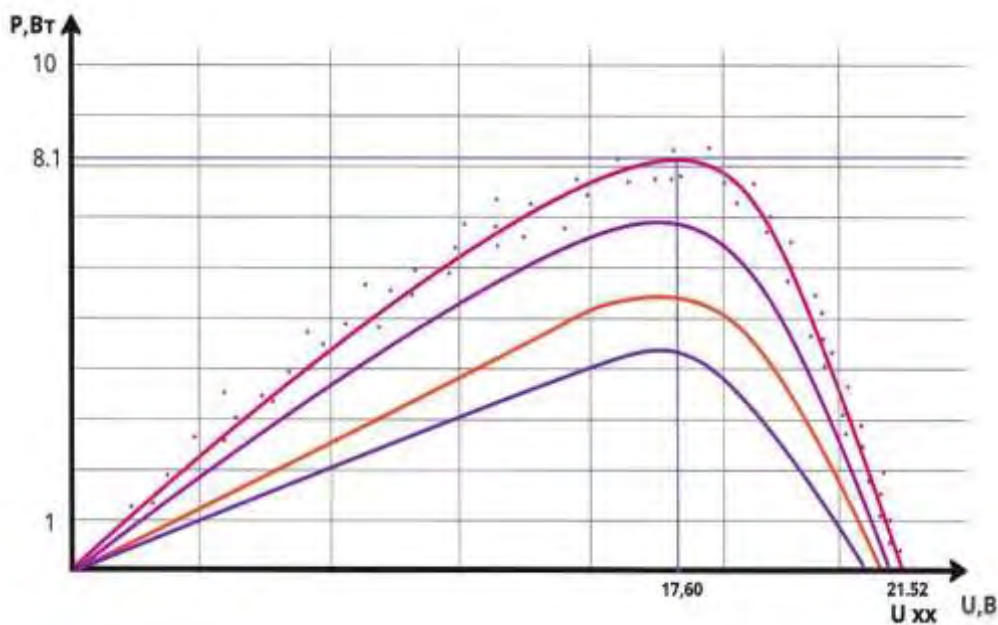


Рис. 10. Графік залежності потужності від напруги

За результатами досліджень визначено:

1) форма графіка залежності потужності від напруги не змінна й має один екстремум функції на проміжку, тобто точка максимальної потужності одна;

2) напруга в точках максимальної потужності за різних умов коливається в незначному діапазоні, на відміну від струму;

3) сонячні батареї мають характеристики, що змінюються залежно від умов освітлення, температури й навантаження. Тому, щоб забезпечити найвищу ефективність перетворення сонячної енергії в електричну, необхідно встановити режим роботи сонячної батареї в точці максимальної потужності, використовуючи PWM-принцип для пошуку ділянки, де розміщена точка максимальної потужності (визначається виробником), та MPPT-принцип для коригування й уточнення точки максимальної потужності. Після уточнення положення цієї точки знову використовуємо PWM до зміни вихідної потужності, тобто зміни умов роботи сонячної панелі.

Висновки

Унаслідок проведених досліджень розроблено метод керування системою генерації електроенергії з використанням бездротових технологій. У статті проаналізовано цей метод. Для керування системою було обрано мікроконтролер PIC 16f18877. Для комунікації між процесором і застосунком використовувався модуль ESP8266-ESP-12S. Побудова UI – інтерфейсу застосунку – ґрунтується на технології *Jetpack Compose*. Зазначений метод може використовуватися в системі "Розумний будинок" або в інших системах сталого живлення споживачів.

Дослідження показали, що точка максимальної потужності залежить від освітлення, напруга коливається в незначному діапазоні, на відміну від струму. До того ж форма графіка залежності потужності від напруги не змінна.

Мета розробленого методу пошуку точки максимальної потужності – на основі наявних рішень знайти принцип, що мінімізує недоліки кожного з них. Метод пошуку точки максимальної напруги є комбінацією методів MPPT і PWM.

Список літератури

1. Acharya S., Aithal P. S. Innovations in effective management of energy using green technology. *International Journal of Conceptions on Management and Social Sciences*. № 3(2). 2015. P. 18–22.
2. Acharya S., & Aithal P. S. Opportunities and Challenges for Producing Solar Energy In Every Indian Home – A Case Study. *International Journal of Case Studies in Business, IT and Education (IJCSBE)*. 2017. 1(2). P. 114–119. DOI: <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.1133921>
3. Andrusevich A., Omarov S., Starodubcev N., Nevliudova V. Study of the influence of the modern robotization level on the challenges and risks of the economic security of an industrial enterprise, *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2022. № 3 (21). P. 70–79. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.21.070>
4. Comparison of Different MPPT Algorithms with a Proposed One Using a Power Estimator for Grid Connected PV Systems. Publishing Open Access research journals & papers Hindawi. URL: <https://www.hindawi.com/journals/ijp/2016/1728398> (дата звернення: 24.04.2023)
5. Amit Kumer Podder, Naruttam Kumar Roy, Hemanshu Roy Pota MPPT methods for solar PV systems: a critical review based on tracking nature. *IET Renewable Power Generation*. Vol. 13. Issue 10. 2019. P. 1615–1822. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.5946>
6. PIC16F18877. *Empowering Innovation Microchip Technology*. URL: <https://www.microchip.com/en-us/product/PIC16F18877> (дата звернення: 05.04.2023)
7. Wallies Thounaojam, Ebenezer V., Avinash Balekundri Design and development of microcontroller based solar charge controller. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2014. Vol. 4(5). P. 510–513. URL: https://www.academia.edu/25724127/Design_and_Development_of_Microcontroller_Based_Solar_Charge_Controller
8. Fude Liu, Wentao Wang, Lei Wang and Guandong Yang MScWorking principles of solar and other energy conversion cells. *Nanomaterials and Energy*. 2013. P. 3–10. DOI: <https://doi.org/10.1680/nme.12.00024>
9. Wenjie Li, Song Jin Design Principles and Developments of Integrated Solar Flow Batteries. *Acc. Chem. Res.* 2020. P. 2611–2621 DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.0c00373>

10. Demenkova T., Korzhova O., Phinenko A. Modelling of Algorithms for Solar Panels Control Systems. *Procedia Computer Science*. 2017. P. 589–596. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.01.072>
11. Khomuliak M., Pylhun A. Control system for positioning of solar panel. *Computer systems and network*. 2018. P. 137–141. DOI: <https://doi.org/10.23939/csn2018.905.137>
12. Vaicys J., Norkevicius P., Baronas, A., Gudzius, S., Jonaitis, A., Pefitsis, D. Efficiency Evaluation of the Dual System Power Inverter for On-Grid Photovoltaic System. *Energie*. 2022. № 15(1). 161. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15010161>
13. Challoo R., Oladeinde A., Yilmazer N., Ozelcik S., Challoo L. An Overview and Assessment of Wireless Technologies and Co- existence of ZigBee, Bluetooth and Wi-Fi Devices. *Procedia Computer Science*. 2012. P. 386–391. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2012.09.091>
14. Князев В. В., Лазуренко Б. О., Серков О. А. Методи і засоби оцінки рівня завадостійкості безпроводних каналів зв'язку. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2022. № 1 (19). С. 92–98. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.19.092>
15. Practical Power Factor Correction Power Factor Electronics Textbook. All About Circuits. Electrical Engineering & Electronics Community. 2020. URL: <https://instrumentationtools.com/topic/practical-power-factor-correction/>

References

1. Acharya, S., Aithal, P. S. (2015), "Innovations in effective management of energy using green technology", *International Journal of Conceptions on Management and Social Sciences*, No. 3 (2), P. 18–22.
2. Acharya, S., Aithal, P. S. (2017), "Opportunities and Challenges for Producing Solar Energy In Every Indian Home – A Case Study", *International Journal of Case Studies in Busines, IT and Education (IJCSBE)*, No. 1(2), P. 114–119. DOI: <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.1133921>
3. Andrushevich, A., Omarov, S., Starodubcev, N., Nevliudova, V. (2022), "Study of the influence of the modern robotization level on the challenges and risks of the economic security of an industrial enterprise", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (21), P. 70–79. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.21.070>
4. Hlaili, M., Mechergu, H., (2016), "Comparison of Different MPPT Algorithms with a Proposed One Using a Power Estimator for Grid Connected PV Systems", *International Journal of Photoenergy*. DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/1728398>
5. Podder, A. K., Roy, N. K., Pota, H. R. (2019), "MPPT methods for solar PV systems: a critical review based on tracking nature", *IET Renewable Power Generation*, Vol. 13, Issue 10, P. 1615–1632. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.5946>
6. "PIC16F18877", *Empowering Innovation Microchip Technology*, available at: <https://www.microchip.com/en-us/product/PIC16F18877> (last accessed 05.04.2023)
7. Thounaojam, W., Ebenezer, V., Balekundri, A., (2014), "Design and development of microcontroller based solar charge controller", *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 4(5), P. 510–513. available at: https://www.academia.edu/25724127/Design_and_Development_of_Microcontroller_Based_Solar_Charge_Controller
8. Liu, F., Wang, W., Wang, L., Yang, G., (2013), "Working principles of solar and other energy conversion cells", *Nanomaterials and Energy*, Vol. 2 (1), P. 3–10. DOI: <https://doi.org/10.1680/nme.12.00024>
9. Li, W., Jin, S., (2020), "Design Principles and Developments of Integrated Solar Flow Batteries", *Acc. Chem. Res*, P. 2611–2621. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.0c00373>
10. Demenkova, T., Korzhova, O., Phinenko, A. (2017), "Modelling of Algorithms for Solar Panels Control Systems", *Procedia Computer Science*, P. 589–596. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.01.072>
11. Khomuliak, M., Pylhun, A. (2018), "Control system for positioning of solar panel", *Computer systems and network*, P. 137–141. DOI: <https://doi.org/10.23939/csn2018.905.137>
12. Vaicys, J., Norkevicius, P., Baronas, A., Gudzius, S., Jonaitis, A., Pefitsis, D. (2022), "Efficiency Evaluation of the Dual System Power Inverter for On-Grid Photovoltaic System", *Energies*, No.15(1), 161. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15010161>
13. Challoo, R., Oladeinde, A., Yilmazer, N., Ozelcik, S., Challoo, L. (2013), "An Overview and Assessment of Wireless Technologies and Co- existence of ZigBee, Bluetooth and Wi-Fi Devices", *Procedia Computer Science*, P. 386–391. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2012.09.091>
14. Knyazev, V., Lazurenko, B., Serkov, A. (2022), "Methods and tools for assessing the level of noise immunity of wireless communication channels", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (19), P. 92–98. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.19.092>
15. (2020), "Practical Power Factor Correction Power Factor Electronics Textbook. All About Circuits", *Electrical Engineering & Electronics Community*, available at: <https://instrumentationtools.com/topic/practical-power-factor-correction/>

Відомості про авторів / About the Authors

Корнієнко Єгор Дмитрович – Харківський національний університет радіоелектроніки, студент кафедри електронних обчислювальних машин, Харків, Україна; e-mail: yehor.korniienko@nure.ua; ORCID:0009-0002-7274-2815

Ляшенко Олексій Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри електронних обчислювальних машин, Харків, Україна; e-mail: oleksii.liashenko@nure.ua; ORCID: 0000-0002-0146-3934

Торба Александр Алексєєвич – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри електронних обчислювальних машин, Харків, Україна; e-mail: alexandr.torba@nure.ua; ORCID:0000-0003-2993-2955

Korniienko Yehor – Kharkiv National University of Radio Electronics, Student at the Department of Electronic Computers, Kharkiv, Ukraine.

Liashenko Oleksii – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor at the Department of Electronic Computers, Kharkiv, Ukraine.

Torba Aleksandr – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor at the Department of Electronic Computers, Kharkiv, Ukraine.

MANAGEMENT METHOD OF ELECTRICITY GENERATION SYSTEM USING WIRELESS TECHNOLOGIES

The subject of the study is the method of control and monitoring of the electricity generation system. **The goal of the work** is to investigate and develop a method for controlling the electricity generation system using wireless technologies. **Relevance.** The issues of energy efficiency and the use of alternative energy sources are relevant and important in modern conditions. In particular, solar energy is one of the most perspective areas in solving these problems. It is necessary to have the ability to monitor and control the generation process for optimal use of solar energy. The developed method should control the power generation system using wireless technologies and have flexible modes of operation. The development of the method of effective search for the point of maximum power and the power generation system in general is one of the most important tasks of the work. **The object of the study** is the process of control and monitoring of the electricity generation system. **Research methods.** Solar panel operation methods at maximum power: PWM (Pulse Width Modulation) and MPPT (Maximum Power Point Tracking). **Results.** The management method for the electricity generation system using wireless technologies is proposed in this work. A solar panel and a generator were chosen for electricity generation. The control of generation and system operation is based on the work of a microcontroller, which, in turn, transmits current data and the ability to control the system to a mobile application via a Wi-Fi module. This method can be used in a "Smart Home" system and other systems aimed at sustainable energy supply for consumers. **Conclusion.** The developed management method of the electricity generation system is planned to be used in systems of sustainable power supply for consumers. The method can be improved by integrating with other wireless technologies and adding other objects of electricity generation in the future.

Keywords: electricity generation system; wireless technologies; microcontroller; mobile application; inverter; maximum voltage points.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Корнієнко Є. Д., Ляшенко О. С., Торба А. А. Метод керування системою генерації електроенергії з використанням бездротових технологій. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 2 (24). С. 80–89. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.080>

Korniienko Y., Liashenko O., Torba A. (2023), "Management method of electricity generation system using wireless technologies", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (24), P. 80–89. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.080>

Є. ЛЕГА, С. ЛЯШЕНКО

МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ ОЦІНЮВАННЯ ЦИФРОВОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ

У сучасному світі використання цифрових технологій у навчальному процесі стає все більш актуальним явищем. У зв'язку з цим оцінювання цифрової інфраструктури закладів вищої освіти є надзвичайно важливим. Для цього необхідно застосовувати відповідні методи й алгоритми, що дають змогу визначати якість цифрової інфраструктури та її ефективність у навчанні. З метою підвищення якості освіти й забезпечення максимальної доступності цифрової інфраструктури важливо проводити належне оцінювання. **Предметом** дослідження є методи та алгоритми оцінювання цифрової інфраструктури вишів. **Мета** роботи – аналіз методів оцінювання цифрової інфраструктури закладів вищої освіти та створення універсального підходу для вишів на базі проаналізованих прикладів. У статті вирішуються конкретні **завдання**: аналіз наукових джерел щодо методів і алгоритмів оцінювання рівня цифрової інфраструктури; розгляд основних методів, що використовуються для схожих завдань в Україні та світі; визначення наявних критеріїв і показників оцінювання; розроблення уніфікованих критеріїв, з огляду на специфіку кожного закладу вищої освіти; створення методу оцінювання за певними критеріями та вибір методів для виявлення значущих критеріїв; розроблення алгоритму для оцінювання критеріїв та отримання загальної оцінки; аналіз здобутих результатів. Для досягнення мети й вирішення поставлених завдань застосовані такі **методи**: науковий аналіз, аналіз ієрархій та аналіз експертних оцінок. **Основним результатом** дослідження є розроблення універсального методу й алгоритму оцінювання цифрової інфраструктури закладів вищої освіти, що дають змогу ефективно та більш об'єктивно визначати рівень розвитку цифрової інфраструктури у вишах і порівнювати різні навчальні заклади. **Висновки**: застосування методу допоможе порівнювати заклади вищої освіти з огляду на особливості кожного з них і дасть змогу більш об'єктивно оцінити цифрову інфраструктуру навчальних закладів.

Ключові слова: оцінка; метод; цифрова інфраструктура; аналіз; оброблення; критерій.

Вступ

Цифрова трансформація закладів вищої освіти (ЗВО) є актуальною проблемою, що потребує системного підходу й належної уваги з боку науковців і практиків. Одним із ключових складників цифрової трансформації є цифрова інфраструктура, що забезпечує інформаційні потоки та ефективну роботу всього закладу. Незважаючи на те, що багато вишів активно розвивають свою цифрову інфраструктуру, існує проблема ефективного моніторингу та оцінювання рівня її розвитку. Ця проблема стає особливо нагальною в умовах стрімкого поширення технологій та зміни вимог до освіти.

Зростання якості освіти й високі очікування студентів, викладачів і дослідників щодо доступності та ефективності цифрових технологій примусили університети та інші ЗВО зосередитися на розвитку цифрової інфраструктури. Вимоги до неї значно змінили й ситуація з пандемією COVID-19. Вимушений перехід на дистанційне навчання та онлайн-формат виявив недоліки технічного цифрового складника

вищих шкіл, що призвело до невпевненості в його ефективності та необхідності оцінювання.

Зклади вищої освіти в сучасних умовах не можуть існувати без використання цифрової інфраструктури. Цифрові технології дають змогу ефективно виконувати адміністративні, навчальні та дослідницькі завдання. Недостатній рівень розвитку цифрової інфраструктури може призвести до погіршення якості освіти та зниження конкурентоспроможності навчального закладу загалом.

На сьогодні не існує універсальної методики або алгоритмів оцінювання моніторингу цифрової інфраструктури ЗВО. Крім того, наявні підходи не завжди беруть до уваги особливості навчальних закладів, їх потреби й специфіку функціонування. Отже, постає завдання розробити методи й алгоритми для оцінювання й вивчення цифрової інфраструктури, що враховували б особливості вишів.

Розвиток цифрової інфраструктури є завданням для керівництва закладів вищої освіти. У цьому контексті стаття пропонує критерії та метод для дослідження цифрової інфраструктури вишів, що ефективно оцінюватимуть її рівень і забезпечать подальший розвиток.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для вивчення методів оцінювання цифрової інфраструктури у ЗВО проаналізовано декілька джерел. Зокрема робота "*Digital Infrastructures, Higher Education and the Net-Generation of Students*" [1] залишається досі актуальною у сфері оцінювання цифрової інфраструктури в закладах вищої освіти. Автори пропонують комплексну методіку оцінювання, що ґрунтується на використанні багатьох критеріїв, таких як наявність ІТ-інфраструктури, рівень її захищеності, кваліфіковані кадри з ІТ, рівень використання цифрових технологій тощо. Крім того, у дослідженні зазначено, що для оцінювання безпеки цифрової інфраструктури необхідно враховувати такі аспекти, як наявність заходів захисту від вірусів і зламувань, виконання нормативно-правових вимог щодо захисту персональних даних, доступність та якість каналів зв'язку. Автори наголошують, що критерій безпеки є невід'ємним складником оцінки цифрової інфраструктури. Однак можна зауважити, що відсутність інших критеріїв, зокрема реалізація педагогічних цілей, відповідність міжнародним стандартам і рекомендаціям, може призвести до необ'єктивності здобутих результатів оцінювання. У роботі проаналізовано наслідки впровадження розподіленої системи доступу для студентів, яка може бути використана для забезпечення подальшого розвитку цифрових технологій в освіті.

Варто згадати ще одне дослідження "*Process approach to the evaluation of information systems effectiveness*" [2], у якому подано концепцію використання процесного підходу до оцінювання ефективності інформаційних систем. Цей метод зосереджується на інформаційних системах, що підтримують основну бізнес-діяльність. Важливою особливістю концепції є розширення вивчення обох систем – інформаційної системи й системи виробництва, що пов'язані між собою загальними моделями процесів. У зазначеному дослідженні наголошується на тому, що оцінювання ефективності цифрової інфраструктури має передбачати не лише технічні показники, але й бізнес-показники, зокрема вартість розробки, експлуатації та підтримки, а також необхідність критерію задоволеності користувачів. У статті порушені питання, пов'язані з тим, як оцінювати ефективність інформаційних систем із різних аспектів, а саме наголошується на розгляді стандартів оцінювання та врахуванні контекстуальних чинників. Зазначено, що інформаційні системи є

ключовим елементом у діяльності багатьох організацій, тому важливо мати засоби для оцінювання їх ефективності. У дослідженні також вказано, що деякі методи оцінювання можуть бути обмеженими та не відтворювати реальну ефективність інформаційних систем. Наведено приклади того, як показники продуктивності не враховують інші фактори, зокрема якість роботи системи та її вплив на діяльність організації загалом, через що реальна ефективність системи втрачається. У підсумковій частині аналізованої статті наголошується на необхідності більш комплексного підходу до оцінювання ефективності цифрової інфраструктури.

Дослідження "*Digital transformation initiatives in higher education institutions: A multivocal literature review*" [3] зосереджує увагу на аналізі методів оцінювання електронних навчальних платформ у закладах вищої освіти. Метою цієї статті є виявлення ініціативи цифрової трансформації, що здійснюється вищими навчальними закладами, визначення нових процесів і технологій, що використовуються для їх упровадження. Робота присвячена огляду саме платформ для електронного навчання у вишах. Проведено аналіз і порівняння різних літературних джерел, у яких описано, як саме відбувається впровадження в освітній процес цифрової інфраструктури та різних платформ з погляду їх ефективності, частоти використання та інших ключових характеристик. Перевагою цього дослідження є те, що автори докладно проаналізували літературу й зібрили значну кількість фактів про різні платформи для електронного навчання. Це дало змогу зробити достовірні висновки та надати реальні результати.

Ще однією працею для аналізу обрано "*Digital transformation in higher education: a framework for maturity assessment*" [4]. Стаття є актуальним дослідженням у галузі оцінювання цифрової інфраструктури вищої освіти. У роботі вивчено зрілість цифрової трансформації та порушено проблеми вищої освіти. Важливість цього дослідження зумовлена роллю, яку відіграє цифрова трансформація в сучасній економіці знань. У статті запропоновано нову структуру, основу на системі оцінювання цифрової трансформації *Deloitte 2019* з мегата основним картографуванням процесів вищої освіти *Petkovic 2014*. Наукова робота узагальнює результати багатьох дослідницьких інструментаріїв, зокрема опитування, інтерв'ю, тематичні дослідження та пряме спостереження. Результати засвідчують значну різницю між сприйняттям респондентами

рівня зрілості цифрової трансформації та основними вимогами до ефективності цифрової трансформації. Висновки також доводять, що відсутність цілісного бачення, компетентності в цифровій трансформації, а також структури та оброблення даних є основними проблемами цифрової трансформації.

Наступне дослідження, що було проаналізовано, – "Digital Transformation: A Digital Learning Case Study" [5]. Основною ідеєю є *iGSM (i-Industry, G-Global, S-Smart Education i Mega)*, і вона полягає в тому, щоб стати інтернаціоналізованою освітньою системою, яка б відповідала потребам суспільства й ґрунтувалася на найсучасніших навчальних технологіях. Базуючись на практиці, дослідження проводиться для оцінювання та аналізу статусу цифрової трансформації в академічній діяльності, такий як цифрове навчання в бакалавраті та професійній програмі, після чого рекомендуються резолюції для цифрового навчання в інших програмах. У статті обрано кількісний метод, наголошується на збиранні та обробленні даних цифрового навчання 2018 р. за допомогою доступних ресурсів. Отже, оцінювання цифрової інфраструктури на конкретному курсі дає змогу виявити проблеми та вирішити їх на ранніх етапах, що може позитивно вплинути на процес навчання та задоволення студентів. Дослідження передбачало аналіз наявних інфраструктурних ресурсів та їх використання, виявлення проблем і можливостей для їх поліпшення й оцінювання відповідно до потреб учасників освітнього процесу. У роботі наведено конкретний приклад оцінювання цифрової інфраструктури одного університету, що може бути корисним для інших вищих навчальних закладів. Описано методiku та інструменти оцінювання інфраструктури, що може допомогти іншим дослідникам. Стаття містить корисну інформацію про те, як оцінювати цифрову інфраструктуру та водночас які аспекти потрібно враховувати.

Спираючись на результати описаних вище досліджень, можна зробити висновок, що оцінювання цифрової інфраструктури ЗВО має ґрунтуватися на комплексному підході, що враховує технічні, функціональні та соціальні показники, бізнес-показники, потреби користувачів, процеси управління інфраструктурою та безпеку. Такий підхід дасть змогу створити повну картину про ефективність цифрової інфраструктури навчальних закладів і знайти рішення щодо її розвитку.

Визначення досі не вирішених частин загальної проблеми. Мета роботи

Проблема оцінювання цифрової інфраструктури ЗВО є досить складною та багатогранною. Насамперед оцінювання передбачає аналіз різноманітних складників, а саме: технічної, методичної, педагогічної, науково-дослідної, матеріально-технічної бази тощо. Однією з найбільш значущих проблем оцінювання цифрової інфраструктури є відсутність уніфікованого підходу до оцінки та стандартів, що регулюють її якість. Це ускладнює процес порівняння різних навчальних закладів і створення єдиної бази знань про якість цифрової інфраструктури. Іншою проблемою є відсутність комплексного підходу до оцінювання – єдиного критерію, що враховуватиме всі складники цифрової інфраструктури. Крім цього, ЗВО мають різні потреби та завдання, тому необхідно зважати на специфіку кожного закладу та його потреби для оцінювання цифрової інфраструктури. Відсутність уніфікованих стандартів загалом ускладнює процес врахування особливостей кожного вишу.

Ще одним питанням є розвиток педагогічної компетенції викладачів і працівників вищих навчальних закладів у галузі цифрових технологій. Без належного рівня знань і навичок упровадження новітніх технологій може бути неефективним і навіть спричинити порушення в роботі інфраструктури.

Додатковою проблемою є нестача фінансування на розвиток цифрової інфраструктури ЗВО. Багато закладів не мають коштів для оновлення апаратного та програмного забезпечення, а також для підтримки необхідного інтернет-з'єднання. Неможливо оминати питання безпеки цифрової інфраструктури. Якщо системи не захищені від вірусів і атак на систему, то це може призвести до витоку конфіденційної інформації та негативно вплинути на репутацію закладу.

Недостатня кількість наукових статей і досліджень у цій сфері може спричинити обмежене розуміння того, які аспекти цифрової інфраструктури найбільш важливі для вищих навчальних закладів та які зміни необхідні для покращення ефективності. Це може стати перешкодою для розроблення дієвих рекомендацій щодо вдосконалення інфраструктури. Крім того, збирання відповідних даних може стати важким завданням, оскільки вони можуть бути розсіяні та відсутні в системах обліку. Інформація щодо окремих аспектів цифрової інфраструктури може бути неоднорідною або недостатньою.

Загалом, для успішного оцінювання цифрової інфраструктури ЗВО потрібний комплексний метод, що ґрунтуватиметься на наукових дослідженнях і значній кількості інформації. Такий підхід може допомогти визначити ключові проблеми й надати рекомендації щодо вдосконалення цифрової інфраструктури вищих навчальних закладів. Необхідним є розв'язання питання створення уніфікованих стандартів і критеріїв оцінювання цифрової інфраструктури, що відповідали б вимогам сучасного вишу. Важливо розробити методiku оцінювання, яка давала б змогу збирати, аналізувати інформацію про інфраструктуру в режимі онлайн, а також порівнювати рівень цифрової інфраструктури в різних закладах вищої освіти, зважаючи на їх особливості. Така методика допоможе забезпечити більш точну й об'єктивну оцінку, а також зручний інструментарій для аналізу даних.

Аналіз наявних методів

Методи, що використовуються для оцінювання цифрової інфраструктури закладів вищої освіти, зазвичай запозичені та вважаються звичними для оцінювання будь-якої системи чи інфраструктури. Найбільш поширеними для оцінювання саме цифрової інфраструктури є такі методи: анкетування, спостереження, аналіз логів, експертне оцінювання й *SWOT*-аналіз [6].

Метод анкетування досить широко застосовується для оцінювання цифрової інфраструктури закладів вищої освіти. Цей метод полягає в тому, що респондентам (студентам, викладачам, робітникам адміністрації) пропонується заповнити анкету із запитаннями, пов'язаними з якістю цифрової інфраструктури. Результати обробляються та аналізуються. Переваги методу анкетування полягають в тому, що він досить простий та швидкий, не потребує значної кількості ресурсів та може бути проведений в онлайн-форматі. Крім того, за допомогою анкетування можна дістати детальну інформацію від різних категорій користувачів, що дасть змогу врахувати потреби кожного, а також ознайомитися з актуальними проблемами. Недоліки цього методу полягають у тому, що він не завжди містить точні факти, оскільки результати можуть бути спотворені через недостатню кількість респондентів, неправильне розуміння питань у анкеті або підроблення результатів. Крім того, важко контролювати, наскільки відповіді респондентів

відтворюють справжній стан речей. Дослідження, проведене у Варшавському університеті [7], є прикладом використання методу анкетування для оцінювання якості навчання та цифрової інфраструктури у ЗВО.

Наступний метод, що можна застосувати для оцінювання цифрової інфраструктури закладів вищої освіти, є метод спостереження. Він передбачає безпосередній моніторинг за роботою студентів і викладачів з комп'ютерами, інтернетом, цифровими ресурсами тощо. Для використання зазначеного методу необхідно підготувати спостерігачів, які відвідуватимуть навчальні заклади та збиратимуть необхідну інформацію. Основним завданням спостерігачів є збір інформації про рівень доступності цифрових технологій і ресурсів, їх якість та ефективність застосування. Під час використання цього методу можна дістати більш детальну інформацію про рівень цифрової інфраструктури ЗВО, виявити труднощі та проблеми, з якими стикаються студенти й викладачі в процесі використання цифрових ресурсів. Але, незважаючи на переваги, зазначений метод потребує значних зусиль і часу для здійснення спостережень. Крім того, можлива суб'єктивність оцінювання з боку спостерігачів.

Ще один метод, який можна застосовувати для визначеної мети, – аналіз логів. Це метод дослідження, який полягає в збиранні та аналізі логів системи й дає змогу визначити характеристики роботи системи та її недоліки. Метод логів дуже ефективний для оцінювання цифрової інфраструктури, оскільки допомагає виявити проблеми, які не завжди помічають користувачі. Основна ідея методу полягає в збиранні та аналізі лог-файлів, що створюються системою автоматично. Ці файли містять детальну інформацію про систему, зокрема час роботи, дії користувачів, помилки й відмови. Аналізуючи ці файли, можна виявити проблеми й недоліки системи, що потім усуваються для поліпшення її роботи. Але для дослідження необхідно застосувати значний обсяг даних, що ускладнює аналіз результатів. Окрім цього, важливо пам'ятати про ймовірність виникнення проблем із конфіденційністю інформації та законом про захист персональних даних. Метод аналізу логів використовується в багатьох галузях: технічна підтримка програмного забезпечення, моніторинг систем безпеки, вебаналітика тощо [8]. Дослідження, проведені за допомогою методу аналізу логів, дають змогу підвищити ефективність роботи системи. В оцінюванні цифрової інфраструктури в ЗВО цей

метод може бути застосований для вимірювання продуктивності мережі, ідентифікації ймовірних проблем та їх усунення, а також для аналізу використання ресурсів мережі. Для впровадження методу аналізу логів можна застосовувати програмне забезпечення, що автоматично збирає та аналізує лог-файли, створені різними програмами й системами. Це дає змогу зібрати значну кількість даних і дослідити їх, щоб дістати цінну інформацію.

Наступний метод – експертне оцінювання – використовується для визначення рівня цифрової інфраструктури закладів вищої освіти за допомогою експертної групи, створеної з фахівців у галузі інформаційних технологій та освіти. Зазначений метод полягає в тому, що беруться до уваги різні аспекти цифрової інфраструктури за критеріями, що важливі для конкретного навчального закладу. Експерти оцінюють кожен аспект за допомогою шкали, що визначається для кожного ЗВО. Це може бути 5-, 10-, 100-бальна шкала або будь-яка інша, прийнятна для закладу вищої освіти. Потім оцінки експертів обробляються та узагальнюються з метою визначення загального бала для кожного з критеріїв. Перевага методу експертного оцінювання полягає в тому, що він дає змогу залучити фахівців із різних галузей, які можуть мати неоднакові погляди на проблему оцінювання цифрової інфраструктури. Крім того, метод є досить ефективним і швидким, оскільки не потребує багато часу й ресурсів для збирання інформації. Однак залежність від кваліфікації експертів може впливати на точність оцінки. Крім того, метод дещо обмежений, оскільки не враховує динаміки розвитку технологій та їх впливу на рівень цифрової інфраструктури [9].

Метод *SWOT*-аналізу є широко застосованим інструментом для стратегічного планування й оцінювання потенціалу певного бізнесу, організації, проекту чи ідеї. У контексті оцінювання цифрової інфраструктури закладів вищої освіти метод *SWOT*-аналізу дає змогу виявити переваги й недоліки використання цифрових технологій, а також можливості й загрози, пов'язані з їх впровадженням. *SWOT*-аналіз містить чотири складники: переваги (*Strengths*), недоліки (*Weaknesses*), можливості (*Opportunities*) та загрози (*Threats*). Для проведення аналізу необхідно сформулювати команду експертів зі знанням технологій та освіти, а також попередньо підготувати список критеріїв, що необхідно розглянути. Під час *SWOT*-аналізу експертна команда спочатку аналізує переваги й недоліки цифрової

інфраструктури. На цьому етапі вони розглядають наявні технології, їх функціональність, доступність і якість, а також рівень компетенції персоналу та інфраструктуру, що використовується для їх підтримки. Далі аналізуються можливості та загрози. На цьому етапі визначаються ймовірність розширення або вдосконалення цифрової інфраструктури, нові технології, що можуть бути застосовані для покращення освітнього процесу, та загрози, зокрема неналежне фінансування, недостатня підготовка персоналу та кібератаки. Метод *SWOT*-аналізу є простим і зрозумілим для більшості користувачів. Він не потребує спеціальних знань і може бути застосований у будь-якій галузі. Крім цього, зазначений метод дає змогу визначити найбільш ефективні шляхи розвитку організації та покращувати процеси прийняття рішень, а також виявляє потенціал організації та можливості для його реалізації. Незважаючи на ефективність методу, оцінювання переваг і недоліків, можливостей і загроз може бути досить суб'єктивним, тому *SWOT*-аналіз не завжди дає точний результат. До того ж цей метод має регулярно оновлюватися, щоб відтворювати зміни в індустрії, ринку або ситуації загалом [10].

Кожен з описаних методів має недоліки й переваги. На жаль, використання якогось одного з них не дасть змоги дістати об'єктивну оцінку та виявити всі недоліки й переваги цифрової системи ЗВО. Найкращим варіантом є застосування декількох методів одночасно. Це допоможе використовувати переваги кожного з них, заощадити час і ресурси. Для модифікації та створення єдиного методу з метою оцінювання цифрової інфраструктури необхідно мати уніфіковані критерії, що враховували б особливості кожного вишу.

Матеріали та методи

Методи оцінювання цифрової інфраструктури в закладах вищої освіти застосовуються у світових практиках для поліпшення якості навчання та досліджень. Щоб визначити уніфіковані критерії для оцінювання цифрової інфраструктури, необхідно з'ясувати, які саме методи та критерії використовуються у світових і українських практиках.

Одним із прикладів застосування методу збирання відгуків університетських студентів у Великій Британії є *National Student Survey (NSS)* [11]. Ця програма дає змогу учасникам анкетування оцінювати різні аспекти вищої освіти, зокрема якість

цифрової інфраструктури закладу. Опитування проводиться щорічно, і його мета – зібрати думки студентів про якість навчання, викладання та забезпечення послуг в університетах. Проводиться за допомогою онлайн-анкет, що заповнюють студенти, які закінчують відповідний курс. *NSS* містить питання, що охоплюють такі критерії:

- якість викладання;
- організація курсів;
- ресурси та підтримка навчання;
- оцінка рівня знань, що набули студенти в процесі навчання;
- можливості для розвитку навичок і підготовки до майбутньої кар'єри;
- загальне враження від курсу та університету.

Ці критерії визначені на основі досліджень і консультацій зі студентами, педагогічними працівниками та роботодавцями. Зібрані відгуки допомагають керівництву виявляти проблеми та змінювати свої підходи до навчання та досліджень. *National Student Survey* здебільшого зосереджується на оцінюванні якості вищої освіти загалом та на задоволенні студентів навчальним процесом. *NSS* не має окремих критеріїв, присвячених тільки цифровій інфраструктурі. Однак деякі питання в анкеті стосуються технологій і дистанційної освіти, що пов'язано з цифровою інфраструктурою університету. Наприклад, студентам можуть ставитися запитання щодо доступності ресурсів, таких як електронні бібліотеки, технічна підтримка та зручність використання електронних систем навчання.

Наступним прикладом є проєкт *e-Merge* [12], започаткований 2014 р. в Європейському Союзі для визначення цифрової зрілості закладів вищої освіти та розроблення стратегій з метою покращення їх цифрової інфраструктури. Проєкт використовував методологію *COBIT 5 (Control Objectives for Information and related Technology)*, що дає змогу оцінювати інформаційно-технологічні процеси й ресурси та управляти ними. Для визначення цифрової зрілості закладів вищої освіти застосовано низку критеріїв.

- Людські ресурси: оцінюється, наскільки ефективно ЗВО працює над розвитком компетентностей своїх співробітників у галузі інформаційних технологій.
- Процеси: оцінюється, наскільки якісно навчальний заклад управляє своїми процесами в галузі інформаційних технологій.

- Дані: оцінюється, наскільки добре ЗВО управляє своїми даними та забезпечує їх безпеку й конфіденційність.

- Технології: оцінюється, наскільки ефективно вищ використовує технології для досягнення своїх цілей.

- Прийняття рішень та стратегії: оцінюється, наскільки добре заклад вищої освіти застосовує дані та інформацію для прийняття рішень у галузі інформаційних технологій та розробки стратегій їх розвитку.

Кожен із зазначених критеріїв детально описується та має відповідний набір підкритеріїв, що дають змогу зрозуміти, як саме оцінюються ці аспекти. Оцінювання проводиться на основі анкетування співробітників і студентів, а також документальних матеріалів. Результати надаються у вигляді детального звіту, який містить рекомендації щодо поліпшення цифрової інфраструктури.

Цифрова інфраструктура закладів вищої освіти оцінюється також у межах різних рейтингових систем, наприклад, *Times Higher Education (THE)* [13] та *QS World University Rankings* [14]. Рейтинг *Times Higher Education* відтворює якість навчання й досліджень університетів з урахуванням різних критеріїв. Один із них – цифрова інфраструктура, що оцінюється за допомогою таких показників:

- доступність інтернету та швидкість зв'язку;
- наявність інтерактивних платформ для навчання та співпраці студентів і викладачів;
- використання цифрових технологій для підтримки навчального процесу й наукових досліджень;
- розвиток цифрових навичок серед студентів і викладачів;
- інтеграція цифрових інструментів у процес оцінювання студентів.

Рейтингова система *THE* також визнає, що цифрова інфраструктура є основою якості освіти в XXI ст., і прагне визначити та відзначити університети, які забезпечують студентів і викладачів необхідними цифровими ресурсами для навчання й наукових досліджень. У рейтингах звертається увага на доступність та якість цифрових ресурсів, інтернет-з'єднання, кількість комп'ютерів, що припадає на одного студента, та інші параметри, пов'язані з цифровою інфраструктурою.

QS World University Rankings використовує декілька критеріїв щодо цифрової інфраструктури. Один із них – "Цифрові технології" (*Digital*

Technologies), що оцінює рівень доступності інтернету, якість комп'ютерної техніки та програмного забезпечення для студентів і персоналу вишу. Критерій "Інтернет-ресурси на одного студента" (*International Faculty*) також визначає доступність цифрових ресурсів для студентів і персоналу, зокрема бібліотеки та онлайн-ресурси. Крім того, *QS World University Rankings* пропонує критерій "Інновації" (*Innovation*), що оцінює здатність вишу до інновацій та досліджень у галузі цифрових технологій, а саме розроблення нових технологій і застосування цифрових рішень для покращення якості навчання. Оцінка *QS World University Rankings* залежить від багатьох факторів, зокрема наукових досягнень, репутації вишу серед академічної спільноти й роботодавців, інтернаціоналізації тощо. Однак наявність сучасної цифрової інфраструктури та високоякісних цифрових ресурсів також є важливим критерієм для оцінювання вишів у межах *QS World University Rankings*.

В Україні методи оцінювання цифрової інфраструктури використовуються в ЗВО для визначення рівня доступності, якості та ефективності цифрових технологій і послуг, що надаються студентам і викладачам.

У цьому процесі застосовуються різні методики та критерії оцінювання, що дають змогу з'ясувати якість роботи цифрової інфраструктури та зробити правильні кроки щодо її подальшого розвитку.

Один із таких методів – аудит цифрової інфраструктури. Він передбачає аналіз доступності, надійності та ефективності використання цифрових технологій у навчальному закладі. Аудит проводять для виявлення недоліків у роботі системи, а також для визначення можливостей щодо її подальшого вдосконалення. Кожен заклад індивідуально обирає критерії, за якими необхідно провести аудит.

В Україні досить часто проводяться опитування серед користувачів цифрової інфраструктури. За допомогою такого методу можна дізнатися про задоволення чи незадоволення людей роботою з цифровими інструментами та виявити проблеми. Наприклад, Український католицький університет 2021 р. провів опитування серед студентів щодо цифрової інфраструктури [15]. Окрім того, національні виші активно застосовують методики аналізу ефективності використання електронних ресурсів та інформаційних технологій в освітньому процесі. Зокрема було розроблено методи вимірювання ефективності електронних підручників, систем

відкритого доступу до навчальних матеріалів, відеолекцій та інших ресурсів. Запровадження цих методів дає змогу здійснювати моніторинг, оцінювати якість навчання та підвищувати ефективність використання цифрових технологій в освітньому процесі [16].

На рівні ЗВО методи оцінювання цифрової інфраструктури, імовірно, будуть різними, залежно від потреб і можливостей кожного конкретного закладу. Для оцінювання цифрової інфраструктури часто застосовуються методи анкетування студентів і викладачів, опитування з використанням онлайн-інструментів, тестування застосунків та іншого програмного забезпечення. Деякі заклади вищої освіти надають перевагу методам опитування студентів і педагогічних працівників щодо доступності й ефективності використання цифрових технологій у навчальному процесі. Інші виші залучають зовнішніх аудиторів, які оцінюють і аналізують цифрову інфраструктуру закладу й надають рекомендації щодо покращення її якості та ефективності. Проте застосування методів оцінювання цифрової інфраструктури в Україні поки не поширене, тому є потенціал для роботи в цьому напрямі.

Також в Україні існують державні програми, спрямовані на розвиток цифрової інфраструктури в освітній галузі. Наприклад, 2017 р. уряд України затвердив Програму розвитку цифрової освіти [17], що передбачає створення та підтримку інноваційних центрів і лабораторій, розвиток відкритих інформаційних ресурсів і забезпечення доступу до сучасних технологій навчання для всіх учасників освітнього процесу.

Як видно зі світових і вітчизняних практик, для оцінювання цифрової інфраструктури закладів вищої освіти найчастіше використовуються методи опитування або анкетування. Незважаючи на очевидні недоліки цих методів, заклади вищої освіти досі надають їм перевагу. На жаль, за результатами опитувань не можна об'єктивно оцінити стан цифрової інфраструктури. Для цього необхідно визначити уніфіковані критерії та розробити універсальний метод оцінювання цифрової інфраструктури, який би увібрав переваги різних наявних методів.

Результати досліджень та обговорення

Уніфіковані критерії для оцінювання цифрової інфраструктури закладів вищої освіти є дуже важливим елементом в оцінюванні та порівнянні

навчальних закладів. На сьогодні критерії можуть бути неоднаковими в різних країнах і закладах, що ускладнює порівняння результатів досліджень та коригування інфраструктури.

Одним із найбільших викликів у розробленні уніфікованих критеріїв є те, що вищі навчальні заклади можуть мати різні потреби та вимоги до своєї цифрової інфраструктури. Наприклад, в університетах різних країн існують неоднакові вимоги до рівня доступності технологій і до захисту персональних даних студентів, а також різні закони, що використовуються. Тому важливо розробляти уніфіковані критерії, які були б достатньо гнучкими, щоб враховувати особливості різних вищих навчальних закладів.

Нарешті, важливо брати до уваги, що оцінювання цифрової інфраструктури має бути постійним процесом, що дасть змогу вчасно виявляти недоліки та запроваджувати необхідні зміни. У цьому контексті розроблення уніфікованих критеріїв може стати важливим інструментом для створення ефективної та функціональної цифрової інфраструктури вищих навчальних закладів.

Зважаючи на вищезазначені дослідження, було визначено п'ять основних критеріїв, що можуть стати уніфікованими для всіх навчальних закладів.

- Інфраструктура: якість і доступність обладнання, наявність відповідної програмної та технічної підтримки.

- Доступність і зручність для студентів: наявність онлайн-ресурсів і платформ для зручної роботи з освітньою інформацією.

- Ефективність використання технологій у навчальному процесі. Цей критерій оцінює, наскільки ефективно застосовуються цифрові технології в навчальному процесі, зокрема відеоконференції, онлайн-курси тощо.

- Ефективність використання технологій в адміністративній роботі. Зазначений критерій оцінює використання цифрових технологій в адміністративній роботі, наприклад: електронний запис, електронна звітність, системи управління знаннями, відеоконференції тощо.

- Безпека та захист даних. Цей критерій оцінює наявність і ефективність заходів, що захищають цифрові ресурси й персональну інформацію від зломисників і хакерів.

Для оцінювання цих критеріїв можна використовувати шкалу від 1 до 10, де 1 і 10 –

найнижчий і найвищий бали відповідно. Кожен критерій має підкритерії, що мають бути оцінені за певним методом.

Інфраструктура вищих навчальних закладів є важливим складником для успішного використання цифрових технологій в освітньому процесі. Щоб оцінити якість і доступність обладнання та програмної підтримки ЗВО, можна застосовувати перелічені нижче підкритерії.

- Якість обладнання: оцінювання стану та якості комп'ютерного обладнання, наявність сучасного програмного забезпечення, обсяг пам'яті та швидкість роботи.

- Доступність обладнання: оцінювання кількості комп'ютерів, що припадає на кількість студентів, та їх доступність.

- Ефективність технічної підтримки: оцінювання наявності технічної підтримки для студентів і викладачів, швидкість реагування на заявки про допомогу.

- Рівень програмної підтримки: оцінювання якості та кількості програм, що надаються студентам для роботи з обладнанням.

- Якість інтернет-підключення: оцінювання швидкості та доступності інтернет-підключення для студентів і викладачів.

- Безпека обладнання: оцінювання наявності антивірусних програм і програм для захисту персональних даних.

Для більш об'єктивного оцінювання критерію "Інфраструктура" необхідно використовувати методи анкетування користувачів і спостереження. Спочатку доцільно провести анкетування користувачів цифрової інфраструктури, що дасть змогу зібрати думки щодо якості та доступності обладнання й програмного забезпечення. Наприклад, студенти можуть відповісти на запитання про наявність сучасних комп'ютерних класів, зручність роботи з комп'ютерами, ефективність відповідного програмного забезпечення та технічної підтримки. Викладачі можуть оцінити якість необхідного обладнання та програмного забезпечення для проведення навчального процесу. Наступним кроком стане огляд обладнання та програмного забезпечення. Для цього створюється контрольна група, відвідуються комп'ютерні класи й лабораторії вищого навчального закладу, оглядається обладнання та програмне забезпечення, що застосовується в освітньому процесі. Обидва методи не потребують великої

кількості ресурсів. Використовуючи два методи замість одного, можна дістати більш об'єктивну оцінку цього критерію. Система оцінювання створюється, наприклад, за допомогою обчислення середнього бала для кожного підкритерію за 10-бальною шкалою, а також загального середнього бала, що дає загальну оцінку за критерієм "Інфраструктура".

"Доступність та якість" для студентів є важливим критерієм щодо оцінювання цифрової інфраструктури навчального закладу. Визначення ефективності за цим критерієм може бути проведене шляхом використання методів експертного оцінювання в поєднанні з анкетуванням. Необхідно залучити експертів, які б могли оцінити наявні цифрові ресурси для навчання, їх якість і актуальність. За допомогою методу анкетування можна дізнатися від студентів їхню думку щодо навчальних матеріалів, якими вони користуються.

Для оцінювання наявності, якості та доступності цифрових ресурсів у ЗВО необхідно виокремити такі підкритерії:

- кількість електронних баз даних, що доступні студентам і викладачам;
- кількість електронних книг і журналів, наявність у бібліотеці закладу вищої освіти;
- якість електронних книг і журналів;
- швидкість доступу до навчальної інформації;
- актуальність книг, журналів, наукових робіт;
- рівень доступності вебсайту закладу вищої освіти для студентів і викладачів;
- зручність використання вебсайтів;
- рівень доступності інтернет-підключення в приміщеннях закладу вищої освіти;
- кількість комп'ютерів, доступних для студентів і викладачів у закладі вищої освіти;
- наявність вебресурсів для дистанційного навчання.

Наявність онлайн-ресурсів, зокрема електронних бібліотек, навчальних платформ та інших онлайн-інструментів, є важливим показником доступності навчальної інформації для студентів. Ці ресурси мають бути досяжні в постійному режимі, щоб забезпечувати користувачів навчальними матеріалами в будь-який час. Зручність для студентів оцінюється за наявністю інтуїтивно зрозумілих інтерфейсів і освітніх платформ. Навчальна інформація має бути легкодоступною та зрозумілою для користувачів, незалежно від рівня їхньої технічної підготовки.

Швидкість доступу до навчальної інформації також є важливим параметром для оцінювання цього критерію. Інтернет-з'єднання, наявність серверів та інші технічні параметри мають забезпечувати швидкий доступ до навчальної інформації.

Окрім залучення експертів та анкетування, можна аналізувати кількість звернень до технічної підтримки щодо доступу до навчальної інформації. Наприклад, якщо багато студентів звертається за допомогою в доступі до певної платформи або ресурсу, то можна вважати, що цей ресурс не зручний для використання.

Загалом оцінювання доступності та якості може бути проведено за допомогою комплексного підходу, що передбачає анкетування, експертний огляд та оцінювання. Також важливо враховувати рівень задоволення студентів від використання цих ресурсів і платформ, що можна дізнатися зі зворотного зв'язку з користувачами. Необхідно забезпечити зручний та ефективний доступ до навчальної інформації для всіх студентів, незалежно від місця їхнього перебування.

"Ефективність використання технологій у навчальному процесі" є одним із ключових критеріїв, що застосовується для оцінювання цифрової інфраструктури в закладах вищої освіти. Цей критерій визначає, наскільки ефективно використовуються цифрові технології в процесі навчання та як вони допомагають забезпечити якісну освіту. Оцінювання ефективності застосування технологій у навчальному процесі може здійснюватися за допомогою нижчезазначених підкритеріїв.

- Аналіз відвідуваності та використання онлайн-курсів: оцінювання кількості студентів, які відвідують онлайн-курси, та їхньої активності на цих курсах.
- Оцінювання застосування інтерактивних технологій: вебквестів, онлайн-тестів тощо.
- Аналіз відеоконференцій, зокрема оцінювання їх якості, доступності та ефективності в реалізації навчальних цілей.
- Задоволення користувачів: оцінювання задоволення від використання цифрових технологій та інтерактивних інструментів у навчальному процесі.
- Аналіз результатів навчання: їх оцінювання та порівняння з попередніми результатами.

Для визначення ефективності використання технологій у навчальному процесі необхідно запроваджувати комплексний підхід, що передбачає застосування всіх вищезазначених показників.

Важливо поєднати методи спостереження й анкетування та проаналізувати результати. Такі підкритерії, як відвідуваність, використання інтерактивних технологій, ефективність відеоконференцій, результати навчання та успішність випускників, мають бути оцінені за допомогою незалежної фокус-групи, яка перевірить реальні дані для кожного з підкритеріїв і зможе об'єктивно їх оцінити. Відгуки користувачів і рівень їхнього задоволення доцільно оцінити у вигляді опитування.

"Ефективність використання технологій в адміністративній роботі" є ще одним критерієм для оцінювання цифрової інфраструктури. Цей показник визначає, наскільки добре використовуються цифрові технології для забезпечення різних аспектів адміністративної роботи, таких як облік, контроль, планування, моніторинг і звітність.

Для оцінювання зазначеного критерію можна застосовувати перелічені нижче підкритерії.

- Рівень автоматизації адміністративних процесів: визначення наявності та ступеня автоматизації адміністративних процесів, що забезпечують роботу закладу вищої освіти.
- Рівень кваліфікації персоналу: оцінювання наявності та рівня знань і навичок персоналу в галузі використання цифрових технологій в адміністративній роботі.
- Кількість витраченого часу на виконання адміністративних процесів.
- Кількість помилок, що виникають під час адміністративної діяльності.
- Рівень задоволення клієнтів.

Для визначення конкретної оцінки за кожним підкритерієм необхідно використати комплексний метод оцінювання. Для з'ясування рівня кваліфікації персоналу може бути застосована методика проведення тестів або анкетування. Для оцінювання рівня автоматизації адміністративних процесів, кількості витраченого часу на виконання адміністративної діяльності, наявності помилок у здійсненні адміністративних процесів – аудиторська перевірка. Для визначення рівня задоволення клієнтів необхідно використати метод опитування. Важливо опитати студентів і викладачів, яким були надані послуги адміністрації, і заміряти їхній рівень задоволення.

Оцінювання безпеки в процесі застосування цифрових технологій у навчанні може бути проведене на основі декількох факторів. Насамперед важливо оцінити наявність заходів безпеки, що були впроваджені в систему, зокрема йдеться про

антивірусні заходи, шифрування даних, використання двофакторної автентифікації тощо. Крім того, необхідно оцінити безпеку застосування цифрових інструментів у навчанні. Наприклад, якість паролів користувачів, які входять у систему, а також умови зберігання паролів можуть впливати на рівень безпеки системи. Також потрібно враховувати фактори, що впливають на захист конфіденційної інформації, зокрема наявність механізмів захисту від несанкційного доступу до даних.

Для оцінювання безпеки можна використовувати стандарти та рекомендації, розроблені для інтернету. Необхідно застосовувати стандарти *ISO 27001* [18] або *NIST Cybersecurity Framework* [19], які детально описують процеси й вимоги для забезпечення безпеки в цифровому середовищі.

Аудит безпеки полягає в перевірці системи безпеки на відповідність стандартам, зокрема у виявленні потенційних вразливостей та можливих загроз безпеці. Тестування на проникнення дає змогу оцінити ймовірність зламу системи й забезпечити відповідний захист. Оцінювання ризиків допомагає визначити можливі загрози та заходи безпеки, що необхідно вжити. Тестування на відповідність дає змогу з'ясувати, наскільки система відповідає стандартам безпеки. Окрім цього, важливою є відповідна освіта з питань кібербезпеки та захисту інформації серед студентів і викладачів. Можна проводити тренінги, семінари, вебінари тощо, де фахівці з кібербезпеки навчатимуть користувачів розпізнавати загрози та захищати свої дані.

Оцінювання безпеки має бути проведене з урахуванням потреб та вимог до неї в кожному конкретному випадку. Важливо, щоб результати оцінювання були прозорі та доступні для відповідних зацікавлених сторін. Забезпечення безпеки має бути постійним процесом, який передбачає вдосконалення систем і інфраструктури, а також підвищення кваліфікації співробітників, як викладачів, так і адміністративного персоналу. Необхідно, щоб оцінювання безпеки передбачало також аудит безпеки інформаційних систем, що використовуються в навчальному процесі. Аудит – це перевірка наявності відповідних захистів від зловмисних програм і хакерських атак, а також обстеження процедур зберігання та оброблення конфіденційної інформації. Результати оцінювання мають бути прозорими й доступними для всіх зацікавлених сторін, що підвищить рівень довіри до навчального закладу й забезпечить безпеку всіх учасників освітнього процесу.

Критерії оцінювання цифрової інфраструктури ЗВО є важливим елементом для забезпечення якісної освіти в епоху цифровізації. Критерії, описані в цій статті, можуть слугувати основою для розроблення уніфікованих критеріїв з метою оцінювання цифрової інфраструктури освітніх закладів. Створення системи оцінювання, що враховує запропоновані критерії, допоможе керівництву ЗВО виявляти переваги й недоліки цифрової інфраструктури й визначати напрями подальшого розвитку.

Для того, щоб оцінити цифрову інфраструктуру вищого навчального закладу, необхідно дотриматися конкретних кроків.

1. Визначення підкритеріїв оцінювання. Для оцінювання цифрової інфраструктури ЗВО можуть використовуватися такі підкритерії, як якість та доступність обладнання, наявність відповідної програмної та технічної підтримки, зручність для студентів, ефективність використання технологій у навчальному процесі, цифрових технологій в адміністративній роботі.

2. Визначення вагових коефіцієнтів для кожного підкритерію. Вагові коефіцієнти вказують на значущість усіх складників у межах загального критерію оцінювання цифрової інфраструктури. Для визначення вагових коефіцієнтів можуть використовуватися методи аналізу ієрархій (АНР) або аналізу експертних оцінок (ЕЕА).

3. Визначення балів для кожного підкритерію. Бали виставляються шляхом оцінювання кожного підкритерію за шкалою від 0 до 10 або іншої відповідної шкали. Оцінювання можуть проводити відповідальні працівники ЗВО, студенти або інші зацікавлені сторони.

4. Обчислення загального бала. Підсумковий бал визначається як сума балів за кожен із підкритеріїв, зважених на їх вагові коефіцієнти. Загальний бал виражається у відсотках, якщо його нормалізувати до максимально можливого бала, або застосовується шкала оцінювання, що визначає різні діапазони балів.

5. Аналіз результатів і висновки. Відповідно до результатів оцінювання цифрової інфраструктури можна зробити висновки про її рівень і виявити основні проблеми. Наприклад, якщо результати оцінювання підкритеріїв 1 та 2 є низькими, це може вказувати на проблеми з якістю обладнання та доступністю для студентів. Якщо ж низькі бали за підкритеріями 3 та 4, це, імовірно, свідчить про неефективне використання технологій у навчальному процесі та адміністративній роботі.

Наведемо алгоритм оцінювання цифрової інфраструктури за описаними критеріями.

1. Визначення вагового коефіцієнта (W) для кожного критерію. Сума всіх вагових коефіцієнтів має дорівнювати 1.

2. Оцінювання кожного підкритерію для всіх критеріїв. Ця оцінка має бути подана числовим значенням від 1 до 10, де 1 – це найнижчий рівень, а 10 – найвищий рівень.

3. Обчислення рівня досягнення для кожного критерію. Рівень досягнення розраховується як добуток оцінки кожного підкритерію на ваговий коефіцієнт цього підкритерію. Рівень досягнення має бути поданий числом від 1 до 10.

4. Обчислення загального рівня досягнення для цифрової інфраструктури. Він розраховується як середнє арифметичне рівня досягнення для кожного критерію.

5. Формула для розрахунку рівня досягнення (S) для кожного критерію може бути записана як

$$S = (P_1 \times W_1) + (P_2 \times W_2) + \dots + (P_n \times W_n),$$

де $P_1 - P_n$ – оцінки підкритеріїв для кожного критерію; $W_1 - W_n$ – вагові коефіцієнти для кожного підкритерію.

Формула для розрахунку загального рівня досягнення (T) для цифрової інфраструктури може бути записана як

$$T = (S_1 + S_2 + \dots + S_n) / n,$$

де $S_1 - S_n$ – рівні досягнення для кожного критерію; n – кількість критеріїв.

Зважаючи на п'ять основних критеріїв, що були перелічені вище, можна отримати більш точні результати оцінювання цифрової інфраструктури закладу вищої освіти. Зазначені критерії та підкритерії сприяють більш об'єктивному оцінюванню вищу, адже для кожного з них використовується комплексний підхід і декілька методів.

Цей метод та алгоритм оцінювання дає змогу скористатися перевагами кожного із застосованих методів. Тому в межах описаного методу порівнюються декілька закладів освіти, а результати виявляються більш точними, адже оцінка залежить від великої кількості критеріїв, що можуть бути оцінені, зважаючи на їх особливості.

Висновки та перспективи подальшого дослідження

Оцінювання цифрової інфраструктури ЗВО є важливим елементом якісного навчання та забезпечення студентів і викладачів зручним та ефективним освітнім середовищем. Інструменти

для оцінювання цифрової інфраструктури мають бути уніфікованими для всіх вищих навчальних закладів, що дасть змогу створити реальний рейтинг вишів за цифровою інфраструктурою та вирішити проблеми абітурієнтів із вибором ЗВО в майбутньому.

Критерії оцінювання мають бути зорієнтовані на технічні можливості та зручність використання цифрових інструментів, що допомагають студентам, викладачам та іншим користувачам університетської системи отримувати доступ до різноманітної інформації, взаємодіяти та співпрацювати один з одним, а також застосовувати цифрові інструменти для ефективного навчання та викладання.

Для оцінювання цифрової інфраструктури можуть бути використані різноманітні методи й підходи, зокрема аудит, анкетування, аналіз застосування тощо. Але найефективнішим буде саме метод комплексного підходу, коли різні критерії оцінюються різними методами. У цьому разі необхідно враховувати конкретні потреби й характеристики ЗВО.

Важливим етапом є визначення показників, за якими здійснюватиметься оцінювання. Наведено більш універсальні критерії, що можна застосовувати для кожного із закладів вищої освіти. Це дасть змогу порівнювати виші один з одним. До основних показників належать інфраструктура, доступність та зручність для студентів, ефективність використання технологій у навчальному процесі, доцільність

застосування технологій в адміністративній роботі, безпека й захист даних. За цими критеріями оцінка може бути повною та вичерпною. Відповідно до побажань навчального закладу, оцінювання цифрової інфраструктури може бути проведене на різних рівнях, зокрема всього вишу загалом, окремих курсів і навіть окремих занять.

Рекомендується оцінювати цифрову інфраструктуру закладу вищої освіти на регулярній основі з метою виявлення проблем і можливостей для вдосконалення. Крім того, важливо забезпечувати активну участь користувачів у процесі оцінювання, що допоможе врахувати їхні потреби та очікування.

Для покращення й розвитку цифрової інфраструктури ЗВО можна рекомендувати здійснювати інвестиції в розвиток технологій, підвищувати кваліфікацію персоналу та залучати експертів у галузі інформаційних технологій. Крім того, важливими є підтримка та співпраця з іншими закладами вищої освіти та галузями з метою обміну досвідом та розроблення спільних проєктів.

Отже, незважаючи на те, що тема оцінювання цифрової інфраструктури закладів вищої освіти не є поширеною в Україні, розвиток у цьому напрямі дасть підґрунтя для створення навчальних закладів нового зразка, з певними стандартами якості та високим рівнем упровадження цифрових технологій.

Список літератури

1. Sims J., Solmonides I. Digital Infrastructures, Higher Education and the Net-Generation of Students. *Asian Social Science*. 2009. № 4 (3). P. 10–17. DOI: <https://doi.org/10.5539/ass.v4n3p10>
2. Krzysztof S., Obluska I. Process approach to the evaluation of information systems effectiveness. *Information Systems Management*. 2012. № 1. P. 148–159, URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/PROCESS-APPROACH-TO-THE-EVALUATION-OF-INFORMATION-Santarek-OB%C5%81USKA/e50fc254f76ea7f881cbef8518f58a33e79fef8c>
3. Fernández A., Gómez B., Binjaku K. Digital transformation initiatives in higher education institutions: A multivocal literature review. *Education and Information Technologies*. 2023. 3149 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10639-022-11544-0>
4. Marks A., AL-Ali M., Atassi R., Abualkishik A. Z., Rezgui Y. Digital transformation in higher education: a framework for maturity assessment. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2020. № 11 (12). P. 504–513. DOI: <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2020.0111261>
5. Tran A., Nguyen H., Nguyen L. Digital Transformation: A Digital Learning Case Study. *The World Symposium on Software Engineering*, 2019. P. 119–124. DOI: <https://doi.org/10.1145/3362125.3362135>
6. Abulibdeh E. S., Syed Hassan S. S. E-learning interactions, information technology, self efficacy and student achievement at the University of Sharjah, UAE. *Australasian Journal of Educational Technology*. 2011. № 27 (6). DOI: <https://doi.org/10.14742/ajet.926>
7. Kocot M., Maciaszczyk M., Kwasek A., Kocot D., Depta A. Assessment and Effectiveness of E-learning and Students' Satisfaction with Online Classes: The Example of Polish Universities. *European Research Studies Journal*. 2021. T. 24. P. 186–199. DOI: <https://doi.org/10.35808/ersj/2457>
8. Begun A. V., Osipova O. I., Urdenko O. G. Situational log-management of information security of the enterprise. *Modeling and information systems in economy. Interdepartmental Sciences*. 2018. № 95. P. 18–29. URL: https://www.researchgate.net/publication/339580012_Systematic_analysis_of_risk_management_information_security_measures
9. Сгорченкова Н. Ю., Тесля Ю. М., Хлевна Ю. Л., Кичань О. М. Методологічні аспекти створення цифрового університету. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проєктами*. 2020. №. (1). С. 31–36. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-3000.2020.1.4>
10. Leiber T., Stensaker B., Harvey L. Bridging theory and practice of impact evaluation of quality management in higher education institutions: a SWOT analysis. *European Journal of Higher Education*. 2018. № 8 (3). P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1080/21568235.2018.1474782>

11. National Student Survey. Офіс студентських справ Великої Британії: вебсайт. URL: <https://www.officeforstudents.org.uk/advice-and-guidance/student-information-and-data/national-student-survey/> (дата звернення: 03.02.2023)
12. E-Merge. A Framework for Assessing and Developing Digital Maturity: вебсайт. URL: <https://euemerge.eu> (дата звернення: 03.02.2023)
13. Times Higher Education: вебсайт. URL: <https://www.timeshighereducation.com/> (дата звернення: 05.02.2023)
14. QS World University Rankings: вебсайт. URL: <https://www.topuniversities.com/university-rankings/world-university-rankings/2022> (дата звернення: 05.02.2023)
15. Національне агенство із забезпечення якості вищої освіти. Відомості про самооцінювання освітньої програми: вебсайт. URL: <https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/ucu.edu.ua/wp-content/uploads/2022/01/Publichne-upravlinnya-Forma-samoanalizu-u-kabineti-garanta.pdf> (дата звернення: 05.02.2023)
16. Міністерство освіти і науки України. Цифрова трансформація освіти та науки: вебсайт. URL: <https://mon.gov.ua/ua/tag/cifrova-transformaciya-osviti-ta-nauki> (дата звернення: 06.02.2023)
17. Кремень В., Биков В., Ляшенко О., Литвинова С., Луговий В., Мальований Ю., Пінчук О., Топузов О. Науково-методичне забезпечення цифровізації освіти України: стан, проблеми, перспективи. Наукова доповідь загальним зборам НАПН України, 18–19 листопада 2022 р., *Herald of the National Academy of Educational Sciences of Ukraine*, 2022. Т. 4. № 2. С. 1–49. DOI: <https://doi.org/10.37472/v.naes.2022.4223>
18. ISO/IEC 27001. Information security management systems: вебсайт. URL: <https://www.iso.org/standard/27001> (дата звернення: 10.02.2023)
19. NIST Cybersecurity Framework: вебсайт. URL: <https://www.nist.gov/cyberframework> (дата звернення: 10.02.2023)
20. Guryanova L., Panasenko O., Voznyuk S. System analysis and modeling of the educational services market. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. 2021. № 1 (15). P. 32–42. DOI: 10.30837/ITSSI.2021.15.032
21. Kraivska I. Моніторинг економічної безпеки підприємств та установ соціальної інфраструктури. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2020. № 3 (13). С. 86–94, DOI: 10.30837/ITSSI.2020.13.086

References

1. Sims, J., Solmonides, I. (2009), "Digital Infrastructures, Higher Education and the Net-Generation of Students", *Asian Social Science*, No. 4 (3), P. 10–17. DOI: <https://doi.org/10.5539/ass.v4n3p10>
2. Krzysztof, S., Obłuska, I. (2012), "Process approach to the evaluation of information systems effectiveness", *Information Systems Management*, No. 1, P. 148–159. available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/PROCESS-APPROACH-TO-THE-EVALUATION-OF-INFORMATION-Santarek-OB%C5%81USKA/e50fc254f76ea7f881cbef8518f58a33e79fef8c>
3. Fernández, A., Gómez, B., Binjaku, K. (2023), "Digital transformation initiatives in higher education institutions: A multivocal literature review", *Education and Information Technologies*, 3149, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10639-022-11544-0>
4. Marks, A., AL-Ali, M., Atassi, R., Abualkishik, A. Z., Rezgui, Y. (2020), "Digital transformation in higher education: a framework for maturity assessment", *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, No.11 (12), P. 504–513. DOI: <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2020.0111261>
5. Tran, A., Nguyen, H., Nguyen, L. (2019), "Digital Transformation: A Digital Learning Case Study", *The World Symposium on Software Engineering*, P. 119–124. DOI: <https://doi.org/10.1145/3362125.3362135>
6. Abulibdeh, E. S., Syed Hassan, S. S. (2011), "E-learning interactions, information technology, self efficacy and student achievement at the University of Sharjah, UAE", *Australasian Journal of Educational Technology*, No. 27(6). DOI: <https://doi.org/10.14742/ajet.926>
7. Kocot, M., Maciaszczyk, M., Kwasek, A., Kocot, D., Depta, A. (2021), "Assessment and Effectiveness of E-learning and Students' Satisfaction with Online Classes: The Example of Polish Universities", *European Research Studies Journal*, Vol. 24, P. 186–199. DOI: <https://doi.org/10.35808/ersj/2457>
8. Begun A., Osipova O., Urdenko O. (2018) "Situational log-management of information security of the enterprise", *Modeling and information systems in economy. Interdepartmental Sciences*, No. 95, P. 18–29. <https://ir.kneu.edu.ua/handle/2010/30976>
9. Yehorchenkova, N., Teslia, Yu., Khlevna, Yu., Kychan, O., (2020), "Methodological aspects of creating a digital university", *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Strategic management, portfolio, program and project management*, No. (1), P. 31–36. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-3000.2020.1.4>
10. Leiber, T., Stensaker, B., Harvey, L. (2018), "Bridging theory and practice of impact evaluation of quality management in higher education institutions: a SWOT analysis", *European Journal of Higher Education*, No. 8 (3), P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1080/21568235.2018.1474782>
11. National Student Survey. Office of Student Affairs of Great Britain, available at: <https://www.officeforstudents.org.uk/advice-and-guidance/student-information-and-data/national-student-survey/> (last accessed 03.02.2023)
12. E-Merge. A Framework for Assessing and Developing Digital Maturity, available at: <https://euemerge.eu> (last accessed 03.02.2023)
13. Times Higher Education, available at: <https://www.timeshighereducation.com/> (last accessed 05.02.2023)
14. QS World University Rankings, available at: <https://www.topuniversities.com/university-rankings/world-university-rankings/2022> (last accessed 05.02.2023)
15. The National Agency for Higher Education Quality Assurance. Information on the self-evaluation of the educational program, available at: <https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/ucu.edu.ua/wp-content/uploads/2022/01/Publichne-upravlinnya-Forma-samoanalizu-u-kabineti-garanta.pdf> (last accessed 05.02.2023)

16. Ministry of Education and Science of Ukraine. Digital transformation of education and science, available at: <https://mon.gov.ua/ua/tag/cifrova-transformaciya-osviti-ta-nauki> (last accessed 06.02.2023)
17. Kremen, V., Bykov, V., Liashenko, O., Lytvynova, S., Luhovyi, V., Malovanyi, Yu., Pinchuk, O., Topuzov, O. (2022), "Scientific and methodical support of digitalization of education in Ukraine: state, problems, prospects", Scientific report to the general meeting of the National Academy of Educational Sciences of Ukraine, November 18-19, 2022, *Herald of the National Academy of Educational Sciences of Ukraine*, Vol. 4, No. 2, P. 1–49. DOI: <https://doi.org/10.37472/v.naes.2022.4223>
18. ISO/IEC 27001. Information security management systems, available at: <https://www.iso.org/standard/27001> (last accessed 10.02.2023)
19. NIST Cybersecurity Framework, available at: <https://www.nist.gov/cyberframework> (last accessed 10.02.2023)
20. Guryanova, L., Panasenko, O., Voznyuk, S. (2021) "System analysis and modeling of the educational services market", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, No. 1 (15), P. 32–42. DOI: 10.30837/ITSSI.2021.15.032
21. Kraivska, I. (2020). "Monitoring of economic security of enterprises and institutions of social infrastructure", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, No. 3 (13), P. 86–94. DOI: 10.30837/ITSSI.2020.13.086

Received 20.05.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Лега Євгенія – Харківський національний університет радіоелектроніки, студентка кафедри електронних обчислювальних машин, Харків, Україна; e-mail: yevheniia.leha@nure.ua; ORCID ID: 0009-0002-5814-9564

Ляшенко Оле ч – доктор технічних наук, професор, Державний біотехнологічний університет, професор кафедри мехатроніки, безпеки життєдіяльності та управління якістю, Харків, Україна; e-mail: s.lyushenko@btu.kharkov.ua; ORCID ID: 0000-0001-8304-9309

Leha Yevheniia – Kharkiv National University of Radio Electronics, student, Kharkiv, Ukraine.

Liashenko Serhii – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Sovereign Biotechnological University, Professor at the Department of Mechatronics, Life Safety and Management, Kharkiv, Ukraine.

METHODS AND ALGORITHMS FOR ASSESSING THE DIGITAL INFRASTRUCTURE OF HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

In the modern world, the use of digital technologies in the educational process is becoming increasingly relevant. In this regard, the assessment of the digital infrastructure of higher education institutions is extremely important. To do this, it is necessary to use appropriate methods and algorithms to assess the quality of the digital infrastructure and the effectiveness of its use in the educational process. In order to improve the quality of education and ensure maximum accessibility to digital infrastructure, it is important to evaluate its effectiveness and quality. The subject of research in the article is the methods and algorithms for assessing the digital infrastructure of higher education institutions. The aim of the work is to analyze the methods for assessing the digital infrastructure of higher education institutions and creating a universal approach for higher education based on the analyzed examples. The following tasks are solved in the article: analysis of scientific sources on methods and algorithms for assessing the level of digital infrastructure, determining the main methods used for similar tasks in Ukraine and the world, determining existing assessment criteria and indicators, developing unified criteria that take into account the specifics of each institution of higher education, developing a method assessments according to these criteria and selection of methods for assessing certain criteria, development of an algorithm for evaluating criteria and obtaining an overall assessment, analysis of the results obtained. To achieve the goals and solve the tasks set were used following methods: methods of scientific analysis, methods of analysis of hierarchies and expert assessments. The main conclusions of the article are the development of a universal method and algorithm for assessing the digital infrastructure of higher education institutions, which will effectively and more objectively determine the level of development of digital infrastructure in higher education institutions and compare different institutions. Conclusions: The application of the method will help in comparing higher education institutions, taking into account the specifics of each of them, and will provide a more objective assessment of the digital infrastructure in the institution.

Keywords: software engineering; knowledge bases; reuse of knowledge; algebra of finite predicates; facts; rules.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Лега Є. С., Ляшенко С. О. Методи та алгоритми оцінювання цифрової інфраструктури закладів вищої освіти. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 2 (24). С. 90–103. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.090>

Leha, Y., Liashenko, S. (2023), "Methods and algorithms for assessing the digital infrastructure of higher education institutions", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (24), P. 90–103. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.090>

YA. LEIBA, M. SHIROKOPETLEVA, I. GRUZDO

RESEARCH ON METHODS OF DETERMINING CUSTOMER LOYALTY AND ASSESSING THEIR LEVEL OF SATISFACTION

The subject of research in the article is methods of data collection and processing to assess the level of customer satisfaction and loyalty to the company, as well as the possibility of evaluating the collected data. **The purpose** of the work is the analysis of methods for determining customer loyalty and assessing their level of satisfaction, the development of a unified assessment algorithm based on various types of data. The article deals with the following **tasks**: analysis of information acquisition methods – questionnaires and reviews, evaluation methods definition and comparison questionnaires with closed answers, reviews and open answers' text tonality evaluation methods analysis using an artificial intelligence, development of an algorithm for determining a unified evaluation and conducting an experiment. The following **methods** are used: theoretical research methods for determining existing data collection methods, as well as methods for assessing the level of customer loyalty and satisfaction using CSI, CSAT indexes, NLP methods for determining the text tonality, bringing the calculated values to one scale, determining the method of a unified assessment; empirical research methods for conducting an experiment, determining and proving the feasibility of applying the method. The following **results** were obtained: a method of assessing customer loyalty and their level of satisfaction based on the analysis of various types of information with further results unification was proposed. Various types of data are responses to questionnaires and user reviews. The questionnaires are analyzed using KPI, and reviews – using artificial intelligence methods. After normalizing the results (bringing them to one scale), the additive convolution method is used to unify the overall result. A prototype of the software system has been developed, which allows you to carry out a full cycle from collecting information to calculating both KPI-metrics and a unified assessment. **Conclusions**: Experimentally, it was determined that the method of assessing customer loyalty and their level of satisfaction based on the unification of a comprehensive assessment of various types of data is efficient and can be used to optimize business processes by reducing time and efforts spent on analyzing the gathered data. The use of this method is fully justified, since the measurement error is low, and the margin of error is acceptable.

Keywords: unified assessment; customer satisfaction level; customer loyalty; reviews; questionnaires.

Introduction

At a time of rapid development in the service sector, customer focus is gaining importance [1, 2]. Satisfied customers are considered the most important factor in any business, as their satisfaction is one of the key elements that contribute to business development and growth.

A secondary goal of a business is not only the provision of services, but also the customer's satisfaction with both the quality of these services and the appropriate level of service. These factors have a direct impact on the likelihood of a customer's repeat business, the popularity of a particular product or service, and increase the company's competitiveness in the market [3, 4].

To track the satisfaction factor, many methods are used, including surveys (both electronic and in-person), receiving feedback in the form of reviews, and offering discounts to attract customers to participate in surveys. All of these methods are effective, but they require a lot of time and the involvement of specialists. The process of tracking the satisfaction factor involves collecting information, processing and analyzing it, drawing conclusions and making the necessary further decisions. However, despite the high cost and considerable time spent, companies continue to conduct such activities.

In addition to the high time costs of organizing and conducting surveys, companies also need to have the appropriate software resources to generate, receive and process the results. The most common methods include [5]: questionnaires, interviews, sociometry, expertise, tests, free-form feedback, and surveys. Usually, such types of surveys as questionnaires and tests are automated, so they require less effort to collect and analyze data, while other types, such as feedback and interviews, are usually partially automated in the form of web forms or specialized applications.

Thus, customer focus for companies is increasingly about product quality, and automating the collection, processing, and analysis of results will significantly simplify the company's tasks, reduce the cost of such activities, and increase the company's analytical capacity. That is why this topic is gaining relevance.

Analysis of recent problems and publications

A significant number of studies by both foreign and domestic scholars have been devoted to the problem of determining customer loyalty and assessing the level of customer satisfaction. Among the Western classics, we highlight the works of F. Kotler, D. Aaker, A. Eisen,

A. Verbel, T. Jones, R. Cunningham, T. Levesque, G.H.G. McDougall, D. McConnell, J. Newman, B. Rice, F. Reicheld, M. Stone, S. Sutton, W. Tucker, G. Tellis, J. Hofmeyer, D. Hoyer, P. Schwartz, M. Fishbein, etc. [2–4, 6–8]. Applied aspects of consumer satisfaction in Ukrainian realities are highlighted in the works of I. Holovachov, O. Litovkina, O. Naumova, I. Ponomarenko, V. Sinkovska, S. Smerichevska, A. Fedorchenko, T. Chunikhin, etc. [9–12]. However, it is important to emphasize that most of them are only theoretical approaches to customer loyalty; the practical component depends on the specific field of application of the existing models, methods and algorithms. Accordingly, modern approaches, models, methods and algorithms require constant study and updating due to rapid changes and development of market relations, as well as adaptation to a specific industry.

Enterprise performance management involves the use of various approaches to ensuring the collection, analysis and use of information on its economic activities, and Ukraine's integration into the global economic space requires the use of modern controlling methodologies in management practice, including the latest systems and concepts of performance management [13].

For a business to be successful, it is necessary to support its operations, constantly monitor the company's performance and improve them. To evaluate the company's performance and customer satisfaction, analysts and marketers often use special metrics called key performance indicators, or KPIs.

KPIs are measurable performance indicators that reflect all the information about a particular area of a company's activities [14]. These are primarily customer relations, company operations, conversions and sales, employee productivity, the level of incentives, etc. The main task of key performance indicators is to optimize the company's processes to increase its productivity.

A considerable number of works by foreign and domestic scholars are devoted to the study of the problems of measuring company performance indicators. Among Western scholars, it is worth mentioning the works of M. Bourne, S. Globerson, R. Kaplan, J. Mills, M. Meyer, D. Norton, E. Neely, K. Platts, H. Rampersad [4, 6, 10, 13, 15]. Among Ukrainian researchers, these are primarily I. Gordienko, O. Martynov, V. Samuliak, I. Seredyna, V. Seredyna, R. Fedorovych, R. Feshchur, etc. [16–18]. It should be noted that solving the same task by different authors can lead to significant variations in the choice of the necessary KPIs, so sometimes it is important to use several KPI assessments for their further comparison.

Because sometimes some KPIs complement each other and answer different questions in the project evaluation process. This should be taken into account when determining the list of required project or company performance indicators. In addition, the choice of KPIs depends on the specific goal, strategic decision-making, different types of activities, time, specific goals, the work of individual departments, the team, the way of communicating with customers, the amount of resources, etc.

In ISO 9001:2015, the word "performance" has two definitions [19]:

- productivity – the degree of achievement of the planned results, the ability of the company to be result-oriented;

- effectiveness – the ratio between the results achieved and the resources spent the company's ability to realize its goals and plans with a given quality level expressed by certain requirements – time, costs, and degree of goal achievement.

The use of KPIs allows an organization to assess its performance and formulate a strategy based on the data obtained.

There are the following types of KPIs:

- target
- process;
- project.

Target indicators include those that reflect the degree of approach to the goal. Process indicators are indicators of economic efficiency. Project indicators are those that reflect the effectiveness of the project. Today, there are a very large number of key performance indicators.

To be effective, a KPI system must have the following characteristics

- correct orientation
- achievability;
- limited tasks;
- ease of perception;
- balance.

Choosing the right KPIs depends on understanding what is important to the company, what processes need to be monitored, and how. The importance directly depends on the area of activity of the department that measures performance. For example, key performance indicators will be different for marketing, finance, and development departments.

An important part of assessing the efficiency and quality of services provided by a company is the level of customer satisfaction. Companies usually receive this information from end users. For this purpose, sociological research methods are used.

Sociological research is a system of consistent methodological, methodological, organizational and technical procedures aimed at obtaining accurate objective information about the social phenomenon or process under study [20].

The stages of empirical sociological research include the following:

- preparatory: defining the goal, developing a program, research work plan and tools;
- collecting primary sociological information: conducting surveys, observations, experiments and/or document analysis;
- processing of the collected information;
- analyzing the collected information, interpreting the results, formulating conclusions and recommendations, and preparing final documents.

To conduct a research, one method of collecting information or a combination of them is used. The most common methods include the following:

- surveys
- interviews
- sociometric survey;
- expert survey;
- document analysis;
- observation;
- experiment.

It is worth noting that none of the methods is universal, and each of them has clear limits of cognitive capabilities. Thus, an incorrectly selected method can lead to a loss of quality of sociological information, which in turn leads to a loss of value and relevance of the conclusions from the collected information.

The study determined that a survey is the best option for determining customer loyalty and assessing the level of customer satisfaction in the system. Therefore, let us consider this method in more detail.

A survey is a method of obtaining primary sociological information based on a set of questions offered to the respondent, and the answers to which form the necessary research information [5]. Information is collected with the help of special tools, namely questionnaires, forms or forms. This method makes it possible to collect sociological data from a large group of people in a short time.

The most commonly used types of surveys are:

- questionnaires
- interview
- sociometric survey;
- expert surveys.

Questionnaire survey is the process of filling out a paper or electronic questionnaire. The most common variant is the distribution of printed questionnaires by a sociologist and consultation on the available questions to obtain more accurate results. Now this method is rapidly becoming electronic.

A questionnaire is a replicated document that contains a system of questions connected by a common logic, formulated and linked to each other according to established rules [5].

Since the questionnaire is filled out directly by the respondent, it is necessary that it has a clear structure and interrelated questions, clearly formulated and understandable for a specific target audience.

The questionnaire consists of the following blocks:

- introductory part;
- contact questions;
- main questions;
- closing questions.

The introductory part contains the purpose of the survey, the rules for completing it, and information about the person or company conducting the survey.

The contact questions section contains socio-demographic information about the respondent.

The main questions block contains questions that help determine the purpose and objectives of the survey.

The questions are divided into open and closed.

Closed-ended questions allow you to express your opinion on a proposed scale, by choosing one or more of the following options.

Open-ended questions allow the survey participant to express his or her opinion in an arbitrary form. In this format, the information is more individualized. Provided that the respondent is familiar with the problem area, such information will be more complete and accurate. If a person is poorly or not at all familiar with the problem area, his or her answers become more stereotypical and uninformative, which can distort the results of the study.

Semi-closed questions are a combination of open and closed questions that allow you to choose from a list of possible options or offer your own if the required option is not listed above.

Closing questions are those that are designed to relieve the respondent's psychological stress, to give the respondent a sense that his or her participation in the survey was necessary.

There are also substantive and functional questions.

Content questions are used to determine the essence of the problem under study, to obtain specific results on the problem raised.

Functional questions are used to eliminate unnecessary information, to make sure that the respondents' answers are accurate, etc.

To get more reliable information, you need to give people the opportunity to express their opinions openly. But usually, the number of questions and the limited time for answering affect the level of encouragement and willingness of the client to participate in the survey. Therefore, a more flexible option is to divide the questionnaire into two parts:

- closed questions in the form of a questionnaire;
- open-ended questions in the form of feedback.

This combination will allow the user to answer a short questionnaire with clearly formulated questions and, if desired, leave feedback. Filling out the questionnaire will save the respondent's time, as they will spend less effort expressing their opinion, and companies will receive concise and clear answers.

Unlike classical questionnaires, processing feedback is a more complex and time-consuming process. Thanks to the development of the information technology industry, in particular artificial intelligence, this process can also be automated using methods of analyzing the tone of the text. For this purpose, Natural Language Processing (NLP) tools are most often used.

Natural language processing is a method of computer analysis and synthesis of natural language based on the methods of artificial intelligence and mathematical linguistics. It involves the development of methods and algorithms that interpret, generate, and recognize human speech. There are the following approaches to natural language processing [21–23]:

- controlled natural language processing – training a model on a sample with labeled data;
- uncontrolled natural language processing – using a statistical language model to predict a pattern;
- natural language understanding (NLU) – recognition and understanding of input information in the form of text; detection of similar meanings in different sentences;
- natural language generation (NLG) – the generation of textual or spoken information based on specified keywords or topics.

Since understanding natural language requires a significant amount of knowledge about the subject

area and interaction methods, this method is considered an AI complete task.

An AI complete task is highly complex, as it requires artificial intelligence to be able to solve a complex task at the level of human intelligence. Such tasks include:

- natural language analysis;
- computer vision;
- systems for generating works of art (literary, visual, musical, etc.);
- decision-making systems.

An AI complete task in the context of binary classification has to process the input information and determine which category it belongs to. For artificial intelligence, this is a difficult task due to a combination of various factors that complicate the processing of the results.

The use of natural language processing methods simplifies the process of determining the tone of user feedback and does not require the mandatory participation of analysts when processing survey results.

The use of computer technology to determine customer loyalty and assess customer satisfaction significantly increases the efficiency of collecting, processing, and analyzing results.

Therefore, **the purpose** is to study methods for comprehensively assessing the level of customer loyalty and satisfaction.

Identification of previously unresolved parts of the overall problem

During the market analysis, the following systems were identified among the available solutions:

- *Zonka*; <https://www.zonkafeedback.com/>
- *SurveyLegend*;
- *Hively*.

Advantages of these systems:

- ease of use;
- user-friendly interface.

Disadvantages of the systems:

- lack of ability to work with feedback or automate its processing;
- simultaneous analysis by only one metric;
- high cost;
- lack of text analysis for mood.

It can be concluded that the above-mentioned software systems do not fully meet the needs of businesses in determining the level of customer loyalty and satisfaction with the company's work.

The main problem of these systems is the lack of assessment of the level of customer loyalty and satisfaction, as well as the lack of the ability to automate the analysis of the tone of feedback using artificial intelligence and unify the assessment of the results obtained. This is necessary to improve analytical capabilities and unify different types of information based on survey results and feedback.

The paper should investigate methods of assessing respondent satisfaction based on the results of questionnaires and feedback, as well as experimentally prove the possibility of forming an overall assessment of customer satisfaction based on the information and feedback received.

To conduct the experiment, the following issues need to be worked out:

- a) analysis of methods of obtaining information:
 - 1) methods of forming questionnaires;
 - 2) determining the type of questions (questionnaires are a closed type of question, feedback is an open type of question);
 - 3) formulation of questions in accordance with the peculiarities of information perception by a particular target audience;
 - 4) drawing up several types of questionnaires according to the type of target audience;
- b) analysis of questionnaires:
 - 1) identification and comparison of evaluation methods;
 - 2) defining criteria and scales for evaluating questionnaires;
 - 3) normalization, reduction to one scale;
- c) analysis of feedback:
 - 1) selection of AI methods for determining the tone of texts;
 - 2) comparison of AI methods;
 - 3) selection and justification of the method;
 - 4) application of the selected method;
- d) combining results, unification of evaluation:
 - 1) normalization, reduction to one scale;
 - 2) applying the convolution method to generate statistical data;
 - 3) development of methods for formulating recommendations.

Once these issues have been worked out, it is necessary to develop a prototype application that will automate surveys, analyze questionnaires for the most popular KPIs, and find out the tone of feedback to determine and unify the assessment of customer satisfaction and loyalty.

Materials and methods

Usually, analysts have to use different services to determine the level of customer loyalty, which complicates the overall process and cost of such measures. This negatively affects the accuracy of the results, increases data processing time, and requires additional study of the results in order to summarize them and use them further.

Customer satisfaction is defined as the level of customer loyalty to the company, which is formed and determined during the customer's interaction with the company's staff, products and services. A sufficiently high level of loyalty is explained by the proper quality of goods and good service. Thus, this level affects whether the customer will use the company's services again.

To maintain the level of loyalty, it is necessary to constantly improve the company's already established activities and consider new areas of work with clients and ways to maintain constant communication and increase background satisfaction. Another important task is to track the quality of the company, team, and products. An equally important component is tracking the trend and level of customer satisfaction against the background of these changes. It should also be remembered that the *Retention Rate* will be different at different stages of the project and the software will need to analyze different metrics.

Common indicators are as follows [24–25]:

- CSAT (*Customer Satisfaction Score*) index;
- CSI (*Customer Satisfaction Index*) index;
- NPS (*Net Promoter Score*) index;
- CRR (*Customer Retention Rate*) index;
- *North Star Metric*.

The CSAT index is a metric that helps determine the level of satisfaction with a customer's experience of interacting with a company based on customer surveys.

A scale from 1 to 5 is used to determine the answers, which reflects the level of customer satisfaction from "very dissatisfied" to "very satisfied" respectively. Having collected all the answers, the CSAT index is calculated using the formula:

$$CSAT = \frac{A_5 + A_4}{A_a} \times 100\%, \quad (1)$$

where A_a – total number of ratings;

A_5 – number of "very satisfied" ratings;

A_4 – number of "satisfied" ratings.

According to the CSAT metric, a sufficient level of customer satisfaction is considered to be a value of 76.5% or more.

The Customer Satisfaction Index (CSI) is a metric used to measure the overall satisfaction of a person with a product, service, or experience.

This metric can be used to find out how a customer feels about a company, as well as to gain insight into various aspects of a business and how a customer feels about it. The following formula is used to calculate the indicator:

$$CSI = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n a_i, \quad (2)$$

where a – measured attribute;

n – number of attributes.

The Net Promoter Score (NPS) is a metric that measures the level of customer loyalty to a company. It is used on the basis of a questionnaire. Usually, the scale is considered to be from 1 to 10, where:

- 0 to 6 – critics;
- 7 to 8 – neutral consumers;
- 9 to 10 – supporters.

$$CRR = \frac{\text{number of customers at the end of the period} - \text{number of customers who came during the entire period}}{\text{number of customers at the beginning of the period}} \times 100\%.$$

The customer retention rate shows how the company works with the base. If you only look for new customers, you can miss out on some of the profit from repeat sales. Even minor changes in the retention strategy will pay off. A 5% increase in the *Retention Rate* can increase profits by 75–95%.

North Star Metric – is a leading metric that shows the core value of a product for users. This metric helps to take into account variable features and change the focus from one metric to another in order not to miss new opportunities and understand the reasons for the deterioration of the user experience. It is this metric that allows you to observe the experience of regular customers and analyze the increase in their background satisfaction, as well as better understand user preferences and bring them closer to the aha moment

Different BI systems are used to calculate them.

Using the described metrics, the company understands the end user better and is able to adjust its actions to improve services, product quality, etc.

One of the challenges is to reduce the values to a single scale, given that the metrics have different scales.

The variability of the value of this metric ranges from –100 to 100, and the value is calculated using the following formula:

$$NPS = C_p - C_d, \quad (3)$$

where C_p – percentage of supporters;

C_d – percentage of critics.

It is important to remember the axiom that it is cheaper for a business to sell to a regular customer than to attract a new one. There is no need to talk in detail about the benefits of the product, introduce the brand – after all, a person is already familiar with the company's range of goods and services and delivery terms. He already has a positive purchase experience and can make another one. The *Customer Retention Rate* (CRR), or *Retention Rate*, is a measure of how well a business retains customers. To determine it, you need to choose the period of time for which you want to calculate the CRR – month, quarter, half a year, year. A good sample is 1 month, because this is enough time to analyze the advertising campaign and analyze customer behavior. However, it is necessary to remember that everything depends on the business sector. Mobile game manufacturers can track CRR on a daily basis.

The CSAT and CSI indices are measured on a scale from 1 to 5, and the NPS index is measured from 1 to 10. We can equate it to a scale from 1 to 5, where 1–3 are critics, 4 are neutral consumers, and 5 are supporters. In order to use these indices simultaneously, it is necessary to reduce them to a common form for further use and increase the accuracy of the assessment.

Thus, all indicators will be calculated on the same scale, which will provide a more accurate overall assessment and increase analytical value. For the effective work of analysts, KPI results should also be additionally displayed in the original version, while maintaining the original value scales.

In addition to questionnaires, feedback is a common form of communication. Usually, it takes not only a lot of time but also a lot of specialists to process them. Feedback usually reflects the client's general attitude towards the company in the form of emotionally colored words.

The combination of feedback and questionnaires more accurately assesses the user. With the help of questionnaires, the respondent answers direct questions about the company and evaluates it within the framework of the questions asked. Unlike a questionnaire, feedback

allows the user to express an opinion and draw attention to relevant aspects outside the scope of the questions and express their attitude to them. Unlike questionnaires, this type of information is more analytically complex and requires the use of artificial intelligence.

Determining the tone of a text is quite a difficult task. There are a number of factors that make it difficult to correctly determine this aspect or lead to an erroneous result [26, 27].

These include

- subjectivity: tone can be variable and perceived differently by different people, for example, the same expression can be seen as positive by one person and negative by another;

- context: the meaning and tone of a text can be strongly influenced by its context;

- development and evolution of language: language is constantly evolving and improving; the emergence of new words and the use of foreign language borrowings complicates the work of AI, which is explained by the low probability of correct interpretation of such vocabulary;

- ambiguity: the use of sarcasm, irony, etc. complicates the possibility of accurate interpretation of the result, as such texts usually have the opposite meaning and can be misinterpreted by AI;

- cultural diversity: complications in the tone of the text may be caused by cultural factors, namely the use of regional dialects and idioms.

To solve the above problems, companies are constantly updating the dictionaries used by AI and improving the algorithm.

There are several artificial intelligence methods that can be used to analyze text tone.

- Rule-based systems. They use a set of rules to analyze text and determine tone. The rules are based on keywords, phrases, or language patterns associated with positive or negative content.

- Machine learning algorithms. The algorithms are trained on a dataset that has pre-marked examples (positive or negative feedback) to learn how to classify new texts. Popular machine learning algorithms for sentiment analysis include the naive Bayesian algorithm, support vector machines (SVMs), and artificial neural networks (ANNs).

- Deep learning. Deep learning methods can also be used to analyze sentiment. Examples of such methods are Convolutional Neural Networks (CNN) and Recurrent Neural Networks (RNN).

- Natural language processing (NLP). Such methods are used to extract characteristics from the text, such as the presence of certain words or phrases, sentence structure, or context.

- The choice of an AI method to solve the text tone analysis task depends on various factors, such as the size and complexity of the data, accuracy requirements, available computing resources, etc. The most suitable method is selected based on the results obtained.

Determine the scope of the methods to choose the best one to use.

Rule-based systems can be used to quickly categorize text into positive, negative, or neutral categories. However, they are limited by the quality of the rules and may not be as accurate as machine learning or deep learning methods.

Machine learning algorithms are more accurate than rule-based systems and can handle more complex data patterns. However, they require a significant amount of labeled training data to be effective, and they may not be as efficient if the data is noisy or the features are not clearly defined.

Deep learning methods are the most accurate method of sentiment analysis and can handle very complex data patterns. They can also be used to obtain more detailed information about feelings, such as emotions or relationships. However, these methods require a significant amount of labeled training data and a large amount of computing resources.

NLP methods can be used to extract characteristics from text that are relevant to tone analysis, such as the presence of specific words or phrases, sentence structure, or the context in which the text appears.

Based on the comparison, it can be concluded that NLP is the best method to use for the task of analyzing the tone of feedback, as it provides more detailed information about the context among all these methods.

The main tasks of NLP include [28]:

- data mining;
- speech synthesis;
- speech recognition;
- natural language generation;
- machine translation;
- question and answer systems;
- topic recognition/determination;
- information retrieval;
- data mining;
- linking;
- text simplification;
- dealing with lexical diversity;

- recognizing abbreviations and titles;
- detecting individual linguistic units;
- morphological decomposition.

Let's consider the feedback processing process more thoroughly.

The processing stages include [29, 30]:

- sentence tokenization;
- extraction of stop words;
- word normalization;
- converting words into a numerical representation

for classification.

Tokenization is the process of breaking down text fragments into more atomic units. Such units can be sentences or words. During tokenization, AI also adds punctuation marks, so there is a need for additional processing of such values.

The next step is the extraction of "stop words". At this stage, the information is cleared of emotionally neutral and meaningless words during classification. Punctuation marks are also removed. The result of this stage is the selection of significant lexemes that emphasize the emotional context, as well as a reduction in the number of words for further processing.

At the normalization stage, all forms of words are reduced to one type by lemmatization. This method uses a special data structure that links all derived forms of a word to its simplest form, called a lemma. Lemma checking is applied for each token.

At the vectorization stage, tokens are converted into a numerical array – various token characteristics. The vectors are used to search for similarities between words and their further classification.

Machine learning classifiers are used to generate a summary that contains information about the objects of the statement and their corresponding tonal vocabulary.

There are four main stages to analyze the emotional coloring of a text:

- data loading;
- data pre-processing;
- classifier training;
- data classification.

These stages include:

- dividing the data into training and evaluation sets;
- selecting an architecture model;
- using data to train the model;
- using test data to evaluate the model's

performance;

– using the trained model to generate new data to make predictions, which in a particular case will be a number between –1.0 and 1.0.

To train the model, it is advisable to use batch data processing, which will reduce memory usage.

For the classifier to work correctly and to be more accurate in determining the tone of the text, it is necessary to train the model on prepared examples taken from open sources.

To evaluate the progress of training, the following values should be calculated:

- true positive results;
- false positives;
- true negatives;
- false negatives.

True positives include documents that were correctly predicted by the model as positive.

False positives include documents that were mistakenly predicted as positive, when in fact they are negative.

True negatives are documents that were correctly predicted by the model as negative.

False negatives include documents that were mistakenly predicted as negative, when in fact they are positive.

The model returns a score from 0 to 1, which indicates the accuracy and completeness of the text tone determination. The general performance indicators of the model include the following [31]:

- accuracy – the ratio of true positive labels to true and false positives;
- recall – the ratio of true positive responses to all true positive responses;
- *F*-measure – a measure of text accuracy, defined as the accuracy and completeness of the text. Precision is the number of correctly identified positive outcomes divided by the number of all positive outcomes, including incorrectly identified ones. Completeness is the number of correctly identified positive results divided by the number of all samples that need to be identified as positive.

If the model is successfully trained, it is possible to use it to work with real data. For the convenience of using the results of the response analysis, we will reduce the result scale of 0–1 to a scale of 1–5. The scale is divided in increments of 0.2.

Feedback that has a score of less than 3 (equivalent to an accuracy of less than 60–40%) is recommended to be provided to employees to identify problematic aspects and further processing.

Once the results of the two parts of the survey (feedback and survey) are obtained, the score will be determined using additive convolution. Since questionnaires have more information directly about the

subject area and more specific answers, this method of evaluation is more significant than feedback, so in total, a coefficient value of 0.6 is proposed for certain indicators, and the impact of CSAT, NPS, CSI will be

$$R_{gen} = CSAT \times 0.2 + NPS \times 0.2 + CSI \times 0.2 + Fb \times 0.4. \quad (4)$$

If only one part of the survey is available, the corresponding value will be taken as the absolute value of the customer satisfaction level. If another part of the survey is received, the score will be recalculated taking into account the results obtained.

To conduct the experiment, we structure the sequence of steps for processing the results to determine a unified assessment of customer satisfaction based on different types of data:

- obtain user data from questionnaires and feedback;
- measure the KPI values based on the obtained questionnaire results (CSI, CSAT, NPS determination by formulas (1–3));
- normalize the results of performance indicators to one measurement scale (see the description of normalization of indicators);
- determine the tone of the feedback, get the probability of the accuracy of the result (see the stages of feedback processing);
- based on the probability, determine the score for the feedback (see normalization of indicators);
- normalize the response score to bring it to the same measurement scale as the questionnaire results;
- using additive convolution, determine the value of the unified score (see formula (4));
- as a result, we return a unified assessment of customer satisfaction based on different types of data.

Depending on the availability of results, the unified assessment may contain one or another data component. That is, if we have only the results of questionnaires, we calculate a unified score, despite the results of the feedback, and vice versa. If we have the results of both the feedback and the questionnaire, the unified score is calculated based on both of these components. The flowchart of the algorithm is shown in Fig. 1.

To implement the algorithm and conduct the experiment, a prototype system was created. For this purpose, an N-layer architecture was used, using *Nest.js* as the *Rest API* server, *React* to develop the web interface, *PostgreSQL* as the database, and *Python* to develop the NLP module [32, 33].

considered equivalent. Feedback has a coefficient value of 0.4 because there is a possibility of irrelevant feedback or an error in determining its tone.

The calculation formula is as follows:

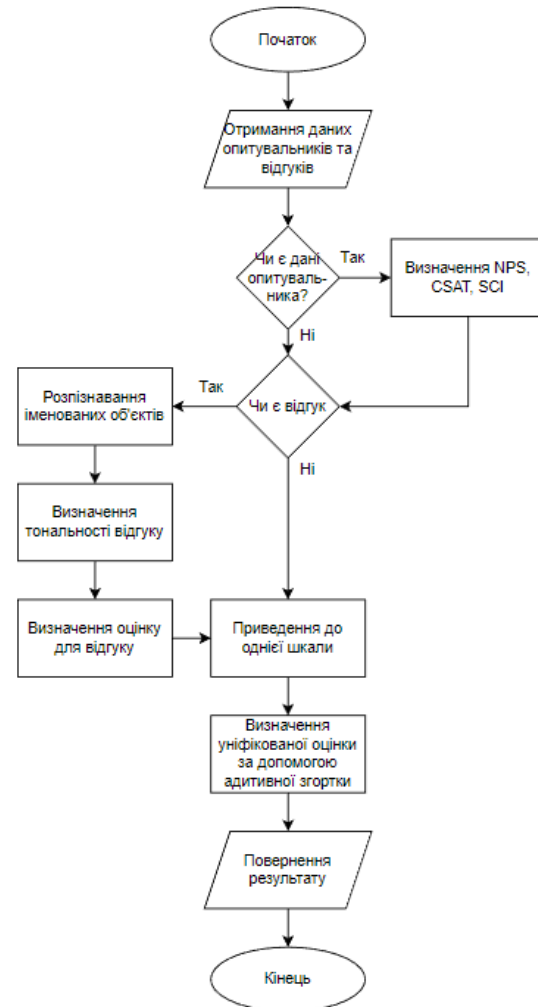


Fig. 1. Flowchart of the algorithm

To determine a sufficient sample size to train a model, you can use the following formula (sample power calculation):

$$n = \frac{t^2 pN(100 - p)}{\Delta^2 N + t^2 pN(100 - p)}, \quad (5)$$

where t is the confidence level, a statistical value whose value for social research is 1.96 (assuming 95% accuracy of the statistical conclusion). The confidence level is set by the researcher in accordance with their requirements for the reliability of the results obtained. The most commonly used confidence levels are 0.95 or 0.99,

p – % of objects that are likely to have a trait

important for the study;

N – the size of the general sample;

Δ is the margin of error in %, set arbitrarily in the process of planning the study.

For our analysis, we chose $p = 80\%$ because not all of the customers provided candid feedback.

Let's calculate the sample size to make sure how much data is needed to train the model.

For our analysis, we chose $p = 80\%$ because not all customers provided honest feedback.

Calculate the sample size to see how much data is needed to train the model.

$$n = \frac{1.96^2 \times 80\% \times 21436 \times (100 - 80)}{5\%^2 \times 21436 + 1.96^2 \times 80\% \times 21436 \times (100 - 80)}. \quad (6)$$

After performing the calculations, we determined that the dataset should have at least 20 thousand responses and be pre-prepared specifically for training and testing models. The grouping was performed with a relatively equal interval. To train the model, we will use

a dataset with reviews taken from a popular online store. This dataset was prepared to train a neural network for natural language processing. It contains 21.436 reviews, 10.718 of which are labeled as positive and negative, and 10.718 reviews without text tone markers to conduct an experiment on the trained model.

During the study, 20 training iterations were conducted.

The next step of the experiment is to conduct a survey and obtain an evaluation for the questionnaire. For this purpose, 24.165 questionnaires were analyzed. It was determined that user responses can be divided into 7 groups. The questionnaire contains 5 questions. Most users left their feedback. Analyzing the feedback with the help of AI, we will get their scores and determine the average value for each group.

To make data analysis easier, let's summarize the answers to the questionnaires and feedback scores in one table. Table 1 shows an example of the survey results.

Table 1. An example of a summary table with questionnaire responses and feedback assessment

Groups	Question 1	Question 2	Question 3	Question 4	Question 5	Feedback
1	5	4	5	4	3	4
2	4	5	4	4	4	4
3	3	4	5	4	5	4
4	5	4	4	3	2	3
5	4	4	5	4	5	4
6	5	5	5	5	5	5
7	4	5	4	5	5	4

Using additive convolution, we determine a unified score for each user.

Next, we calculate the average KPI value based on the answers to the questionnaire for each group. Since each group has a different number of users, we will calculate the percentage of people in each group to establish the correct final score.

To get a unified score for all users for the entire period of time, it is necessary to calculate the average of the previously defined unified scores for each user.

Research results and discussion

Based on the results of the experiment, we have the following graphs of metrics:

- dynamics of changes in metrics indicators over the past five years;
- dynamics of changes in the unified score over the past five years;
- dynamics of changes in the average value of the unified score over the past five years.

For the sake of ease of display, data for some graphs were calculated on a quarterly basis.

Fig. 2 shows the dynamics of changes in metrics over five years for all groups. For greater detail, the metrics are defined for each quarter.

According to Fig. 2, we can conclude that such fluctuations in the indicators are caused by changes in the level of customer loyalty and satisfaction. It can be assumed that the reason for the sharp increase in the indicators is the identification of customer dissatisfaction problems and their solution.

Using the data presented in Fig. 2 and analyzing the feedback, we determined the dynamics of the unified assessment values for each quarter (see Fig. 3).

As can be seen from Fig. 3, the level of customer satisfaction varies greatly from quarter to quarter. Most of the time, there is an increase in the indicators, which may indicate that the company has processed the results of recent surveys and solved certain problems.

Next, we determined the dynamics of the average values of the indicators, taking into account all previous unified assessments, which are shown in Fig. 4. The data are for the last five years.

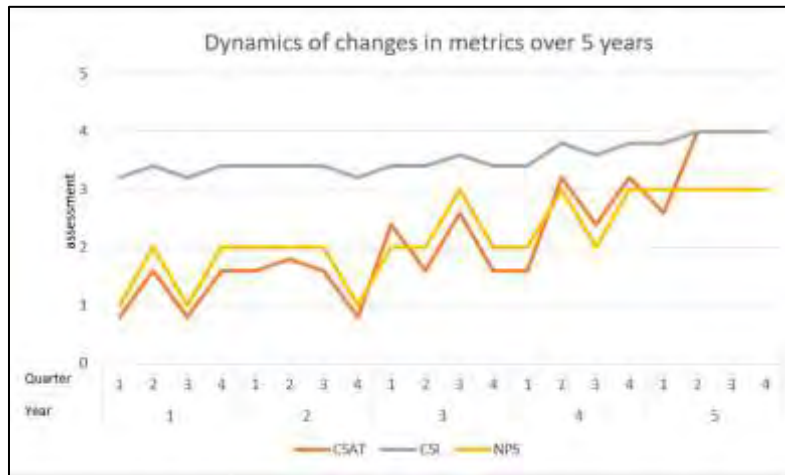


Fig. 2. Dynamics of changes in metrics over five years for all groups

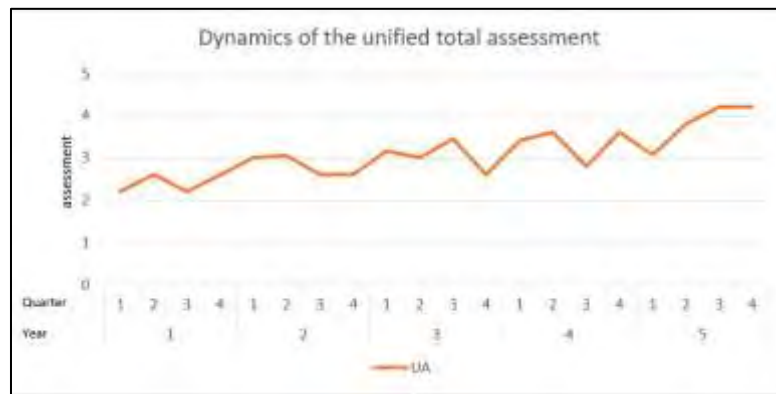


Fig. 3. Dynamics of the unified total assessment for each quarter

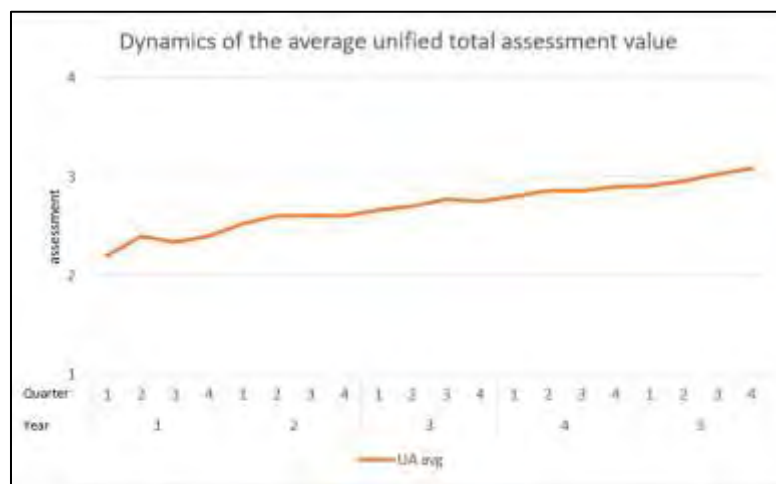


Fig. 4. Dynamics of average values of unified assessment indicators for each quarter

As can be seen from Fig. 4, despite the sharp ups and downs in the metrics, the overall score is growing steadily. Given this, we can conclude that the level of customer loyalty and satisfaction is growing every year. This may be due to the identification of

business problems by collecting information from customers and solving these problems, i.e., regaining customer trust and, at the same time, the level of customer loyalty and satisfaction.

The results of the study showed that the proposed method of unifying the assessment to determine the level of customer loyalty and satisfaction can be applied in real systems. It allows not only to track popular KPIs but also to analyze customer feedback, while spending significantly less resources and time.

Conclusions and prospects for further development

In the course of the work, the subject area was analyzed and the main methods of obtaining information from end users about the quality of service and the company's work were identified. The methods of processing and analyzing the data obtained, methods of determining the results for forming an assessment are characterized.

The study analyzes popular key performance indicators and natural language processing methods. It is determined that the NPS, CSI and CSAT indicators have the greatest analytical value, so it is proposed to use them as the basic ones for use in the algorithm for determining the level of customer satisfaction. In analyzing the methods of natural language processing, the use of *Natural Language Processing* to determine the tone of the text is proposed.

The article proposes a universal method of unifying the assessment to determine the level of customer satisfaction and loyalty based on the results of questionnaires and feedback. This method consists in using the NPS, CSI, CSAT metrics and natural language processing by means of artificial intelligence to reduce these values to one measurement scale for further determining a unified assessment of customer satisfaction. It is calculated using additive convolution and is a general criterion for assessing satisfaction.

The study analyzed and verified the correctness of the results of the developed method. Determining the tone of the response may have an acceptable error

that arises from unreliable input data. As a result, it was determined that the algorithm works in accordance with the requirements. Taking into account all these factors, we can conclude that the use of the method is appropriate. Based on the analysis of the method's shortcomings, ways to improve it are proposed.

In the process of designing a software system prototype, the main requirements and technologies for implementation are identified. The advantages of using these technologies to solve the task are described.

Thus, it has been determined that the method of assessing customer loyalty and satisfaction is based on the unification of a comprehensive assessment of various types of results, and is also effective and can be used to optimize business processes. The described method is not universal, as each business has its own needs. This reason is part of the potential development of the method to expand its scope.

Another disadvantage of the assessment method is the lack of candid customer feedback, as the system takes into account and processes all information. In addition, there is a possibility that the system may incorrectly determine the tone of the feedback, which will also affect the final result.

But, given all the above factors, the use of the method under consideration is quite justified, since the probability of obtaining a false value is low, and the level of permissible error is satisfactory.

In order to improve the method, a study can be conducted using a combined method of feedback analysis with the use of artificial intelligence. This will increase the accuracy of determining the emotional tone of reviews and develop a recommendation model based on them. In addition, to expand the scope of the survey method to cover a larger market segment, it is important to explore the possibility of using additional KPIs in the system.

References

1. Hogleve, J., Iseke, A., Derfuss, K., (2021), "The service-profit chain: reflections, revisions, and reimaginings", *Journal of service research*, Vol. 25(3), P. 460–477. DOI: 10.1177/10946705211052410
2. Narayan, R., Gehlot, A., Singh, R., Akram, S. V., Priyadarshi, N., Twala, B., (2022), "Hospitality feedback system 4.0: digitalization of feedback system with integration of industry 4.0 enabling technologies", *Sustainability*, Vol. 14(19), 12158 p. DOI: 10.3390/su141912158
3. Capuano, N., Greco, L., Ritrovato, P., Vento, M., (2020), "Sentiment analysis for customer relationship management: an incremental learning approach", *Applied intelligence*, Vol. 51, P. 3339–3352. DOI: 10.1007/s10489-020-01984-x
4. Cherednichenko, O., Yanholenko, O., Vovk, M., Sharonova, N., (2020), "Towards structuring of electronic marketplaces contents: items normalization technology", *Proceedings of the 4th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2020)*, P. 44–55, available at: <https://ceur-ws.org/Vol-2604/paper4.pdf>
5. Nichols, P., (2000), *Social Survey Methods: A field guide for development workers*, Oxfam GB. Practical Action Publishing, 132 p.
6. McDougall G. H. G., Levesque, T., (2000), "Customer Satisfaction with Services: Putting Perceived Value into the Equation", *Journal of Services Marketing*, Vol. 14(5), P. 392–410. DOI:10.1108/08876040010340937

33. Kosenko, V. (2017), "Principles and structure of the methodology of risk-adaptive management of parameters of information and telecommunication networks of critical application systems", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1(1), P. 46–52. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.1.046>

Received 16.06.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Лейба Яна Алімівна – Харківський національний університет радіоелектроніки, студентка II курсу, II (магістерського) рівня вищої освіти; e-mail: yana.leiba.cpe@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-6178-2193>

Широкопетлева Марія Сергіївна – Харківський національний університет радіоелектроніки, старший викладач кафедри програмної інженерії, заступник директора центру післядипломної освіти, Харків, Україна; e-mail: marija.shirokopetleva@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7472-6045>

Груздо Ірина Володимирівна – кандидат технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри програмної інженерії, Харків, Україна; e-mail: irina.gruzdo@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4399-2367>

Leiba Yana – Kharkiv National University of Radio Electronics, second year graduated student (master's degree), Kharkiv, Ukraine.

Shirokopetleva Mariya – Kharkiv National University of Radio Electronics, Senior Lecturer at the Department of Software Engineering, Deputy Director of the Center for Postgraduate Education, Kharkiv, Ukraine.

Gruzdo Iryna – PhD (Engineering Sciences), Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor at the Department of Software Engineering, Kharkiv, Ukraine.

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ЛОЯЛЬНОСТІ КЛІЄНТІВ ТА ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ ЇХНЬОЇ ЗАДОВОЛЕНОСТІ

Предметом дослідження є методи збирання й оброблення інформації для визначення рівня задоволеності та лояльності клієнтів щодо компанії, а також можливість оцінювання результатів. **Мета роботи** – аналіз методів визначення лояльності клієнтів та оцінювання рівня їхньої задоволеності, а також розроблення алгоритму визначення уніфікованої оцінки на підставі різнотипних даних. У статті вирішуються такі **завдання**: аналіз методів отримання інформації – опитувальників і відгуків; визначення та порівняння методів оцінювання опитувальників із закритими відповідями; аналіз методів оцінювання тональності тексту відгуків і відкритих відповідей із застосуванням методів штучного інтелекту; розроблення алгоритму визначення уніфікованої оцінки та проведення дослідження. У роботі використано такі **методи**: теоретичні – для визначення наявних методів збирання даних, а також методів оцінювання рівня лояльності та задоволеності клієнтів із використанням індексів CSI, CSAT; методи NLP для виявлення тональності тексту, зведення розрахованих значень до однієї шкали, визначення методу уніфікації оцінки; емпіричні – для проведення експерименту та доведення доцільності застосування методу. **Здобуті результати**. Запропоновано метод оцінювання лояльності клієнтів і рівня їхньої задоволеності на основі аналізу різнотипної інформації з подальшою уніфікацією результатів. Різнотипною інформацією є відповіді на опитувальники й відгуки користувачів. Опитувальники проаналізовано за допомогою KPI, відгуки – завдяки застосуванню методів штучного інтелекту. Після нормалізації результатів (зведення до однієї шкали), використано метод адитивного згортання для уніфікації загального результату. Розроблено прототип програмної системи, що дає змогу провести повний цикл робіт – від збирання інформації до розрахунку як KPI-метрики, так і уніфікованої оцінки. **Висновки**. Експериментально визначено, що метод оцінювання лояльності клієнтів та рівня їхньої задоволеності, оснований на уніфікації комплексної оцінки різнотипної інформації, є ефективним та може застосовуватися для оптимізації процесів бізнесу завдяки зменшенню витрат часу й зусиль на аналіз здобутих результатів. Використання запропонованого методу є цілком виправдане, оскільки вірогідність отримання хибного значення не висока, а рівень допустимої похибки задовільний.

Ключові слова: уніфікована оцінка; рівень задоволеності клієнтів; лояльність клієнтів; відгуки; опитувальники.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Лейба Я. А., Широкопетлева М. С., Груздо І. В. Дослідження методів визначення лояльності клієнтів та оцінювання рівня їхньої задоволеності. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 2 (24). С. 104–117. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.104>

Leiba, Y., Shirokopetleva, M., Gruzdo, I. (2023), "Research on methods of determining customer loyalty and assessing their level of satisfaction", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (24), P. 104–117. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.104>

О. МАЗУРОВА, М. АНДРУЩЕНКО, М. ШИРОКОПЕТЛЄВА

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ *COSMOS DB API* НА ПЛАТФОРМІ *.NET*

Значна кількість сучасних розробників використовують платформу *.NET* для створення програм, що працюють із базами даних. *Cosmos DB* стає все більш популярним вибором як *NoSQL*-сховище для баз даних. *Cosmos DB* – гнучка й масштабована система, і правильний вибір відповідного *API* в програмній реалізації може значно вплинути на продуктивність самих програм. *Cosmos DB* надає різні *API* для роботи з усіма типами баз даних. Кожен із цих *API* може бути використаний за допомогою різних методів програмної реалізації. **Предметом** дослідження є програмні реалізації на платформі *.NET* під різні *Cosmos DB API*. Під час обрання найбільш підходящої *Cosmos DB API* на платформі *.NET* розробникам може допомогти не тільки документація, але й результати експериментальних досліджень *API*, що дасть змогу покращити якість коду й продуктивність самих систем. **Мета роботи** – підвищити ефективність програмних розробок на платформі *.NET*, що використовують *Cosmos DB API*, шляхом створення рекомендацій щодо обрання методів програмної реалізації *API* на основі результатів експериментального дослідження. **Завдання статті:** дослідити та порівняти методи програмної реалізації *Cosmos DB API* шляхом вивчення продуктивності різних типів запитів на цих програмних рішеннях; проаналізувати здобуті результати та розробити рекомендації з використання методів. **Методи:** багатокритеріальний аналіз *Cosmos DB API*, логічне моделювання даних, дослідження. **Результати:** розроблено програмні рішення на основі використання *CosmosClient*, *Entity Framework Core* для *Cosmos DB API for NoSQL* та на основі *MongoClient* для *Cosmos DB API for MongoDB*; проведено серію експериментів і вимірювань показників продуктивності для кожного з програмних рішень; проаналізовано здобуті результати та запропоновано рекомендації з використання розглянутих методів програмної реалізації *Cosmos DB API* на платформі *.NET*. **Висновки.** Загалом вибір програмного підходу залежить від конкретного завдання, але дослідження показали, що *Cosmos DB API for NoSQL* із застосуванням *CosmosClient* – це найкращий вибір для незначних проєктів, а з використанням *Entity Framework Core Cosmos* підходить для проєктів з більшими обсягами інформації та складними запитами. Якщо в проєкті застосовується *MongoDB*, то відповідне рішення з використанням *MongoClient* є кращим варіантом, ніж *Cosmos DB API for NoSQL*.

Ключові слова: база даних; *Cosmos DB API*; *MongoDB*; *.NET*; *NoSQL*.

Вступ

Сучасний підхід до розроблення програмних систем спрямований на те, щоб спростити програму, зробити код простішим і дешевшим для підтримки в майбутньому. Саме тому наразі дуже популярні хмарні розподілені системи, що складаються з багатьох маленьких програм, які відповідають лише за одну функцію. Такі програми називаються сервісами, а архітектура таких систем називається мікросервісною. Така архітектура легка в підтримці та розробленні, за кожен сервіс найчастіше відповідає окрема команда. Це досягається розподіленням завдань, що має виконувати окремий сервіс. Саме тому більшість нових систем розробляється саме з такою архітектурою.

Якщо говоримо про наявні програмні рішення, а саме про системи з монолітною архітектурою, частина з них може виконувати свої функції і сьогодні, частина ж переписується на розподілену архітектуру. Так само і з базами даних. Класичний

підхід використовувати реляційні бази даних (БД) нині не є 100-відсотковою панацеєю. Замість них застосовують нереляційні бази даних *NoSQL*, що здобули популярність, оскільки вони зберігають інформацію в простих зрозумілих формах, які легше змінювати за потреби, ніж типи моделей даних, що застосовуються в реляційних БД. Крім того, бази даних *NoSQL* часто дають змогу розробникам безпосередньо змінювати структуру інформації. Також нереляційні сховища даних надають дуже потужний функціонал масштабування та розподілення по регіонах. Саме тому актуальніе дослідження *Azure Cosmos DB*, що є популярним рішенням для управління розподіленими даними в хмарі. *Azure Cosmos DB* забезпечує глобальну масштабованість, автоматичне реплікування та георозподіл даних, а також підтримує безліч *API*, зокрема *API for NoSQL*, *for MongoDB*, *for Apache Cassandra*, *for Table*, *for Apache Gremlin*, *for PostgreSQL*. Це робить її зручним вибором для багатьох програм, що потребують швидкого доступу до даних із різних

точок світу та підтримки різних типів запитів. Вирішено дослідити та порівняти реалізацію різних програмних інтерфейсів із використанням популярної платформи .NET.

Аналіз проблеми й наявних методів

Інформаційні системи, що працюють на основі баз даних, створюються та використовуються майже в усіх галузях сучасного життя [1, 2]. Реляційні БД продовжують тримати лідерські позиції під час розроблення систем, де необхідна узгодженість даних на високому рівні, або, як прийнято казати в спільноті розробників, підтримка ACID властивостей транзакцій [3]. Водночас усе більше нових секторів бізнесу погоджуються на відкладену узгодженість інформації за умови високої масштабованості відповідних застосунків. Саме для створення таких систем розробники активно використовують бази даних NoSQL [4], що забезпечують високу горизонтальну масштабованість систем і, крім того, зберігають інформацію в простих формах та дають змогу розробникам змінювати структури такої інформації [5]. Так, БД документів не мають установленної структури даних для початку, тому новий тип документа можна зберігати так само легко, як і той, що зберігається наразі [6].

Також NoSQL є популярною основою для систем управління розподіленими даними в хмарі. Такі платформи, як Azure Cosmos DB, Amazon Dynamo DB тощо працюють здебільшого на основі NoSQL БД та забезпечують глобальну масштабованість, автоматичне реплікування та георозподіл даних. Це робить їх зручним вибором для створення інформаційних систем у багатьох галузях, що потребують швидкого доступу до даних із різних точок світу.

Електронна комерція – це досить поширена прикладна галузь для створення систем, до якої належить безліч різних операцій [7]. Це і складський облік, прийом поставок, списання товару, облік номенклатури, оновлення цін товарів, відстеження кількості товарів у різних складських приміщеннях, проведення акцій. Важливою є система збереження даних користувачів, історії замовлень, побажань і транзакцій з оплатами замовлень. Azure Cosmos DB нерідко використовується для розроблення програмних систем, пов'язаних з електронною комерцією.

Azure Cosmos DB часто застосовується саме в галузі роздрібною торгівлі для зберігання даних

каталогу та пошуку подій у конвеєрах обробки замовлень. Також ця система широко застосовується у власних платформах електронної комерції Microsoft, наприклад, у Windows Store і Xbox Live. Azure Cosmos DB підтримує гнучкі схеми та ієрархічні дані, тому є ефективним засобом для зберігання інформації каталогу продуктів.

Функції, надані Azure Cosmos DB, передбачають [8]: масштабування, високу доступність, геореплікацію, кілька місць для запису, автоматичне та прозоре керування сегментами, прозору реплікацію між операційними й аналітичними сховищами.

Саме тому Azure Cosmos DB часто використовується як джерело подій для керування подіями архітектур за допомогою функції каналу змін. Ця функція надає подальшим мікросервісам змогу надійно та поступово зчитувати вставки та оновлення (наприклад, події замовлення), внесені до БД Azure Cosmos. Канал змін можна застосовувати для забезпечення постійного сховища подій, як брокера повідомлень для подій, що змінюють стан, і керувати процесом оброблення між багатьма мікросервісами.

Azure Cosmos DB пропонує кілька API бази даних, зокрема NoSQL, MongoDB, PostgreSQL, Cassandra, Gremlin і Table. Завдяки API можна працювати з інформацією, використовуючи моделі документів, ключ-значення, графіки та сімейство стовпців. Зазначені API дають змогу програмам обробляти Azure Cosmos DB так, ніби це різні технології баз даних, без накладних витрат на керування та підходи до масштабування. Azure Cosmos DB допомагає застосовувати екосистеми, інструменти та навички, що вже має розробник, для роботи з інформацією та виконання запитів за допомогою різноманітних API.

API Azure Cosmos DB для NoSQL зберігає інформацію у форматі документа. Він пропонує найкращий наскрізний досвід, оскільки розробник має повний контроль над інтерфейсом, сервісом і клієнтськими бібліотеками SDK. Будь-яка нова функція, що розгортається в Azure Cosmos DB, спочатку доступна в API для облікових записів NoSQL. Ці облікові записи забезпечують підтримку для запити елементів за допомогою синтаксису мови структурованих запитів (SQL) та одного з найвідоміших форматів обміну даними (JSON), який використовується для збереження та передачі структурованих інформаційних об'єктів між різними застосунками.

Фахівці рекомендують використовувати *API for NoSQL* тоді, коли необхідно перейти з інших баз даних, таких як *Oracle*, *DynamoDB*, *HBase* тощо, і якщо потрібно застосовувати модернізовані технології для створення своїх програм. *API* для *NoSQL* підтримує аналітику й забезпечує ізоляцію продуктивності між операційними та аналітичними навантаженнями.

API Azure Cosmos DB для *MongoDB* зберігає інформацію в структурі документа з допомогою формату *BSON*. Він сумісний із дротовим протоколом *MongoDB*, однак не застосовує жодного рідного коду, пов'язаного з *MongoDB*. Розробники рекомендують використовувати наявні програми *MongoDB* з *API* для *MongoDB*, змінивши рядок підключення та перемістивши будь-які дані за допомогою власних інструментів *MongoDB*, зокрема *mongodump* і *mongorestore*, або інструменту міграції бази даних *Azure*. Інструменти, а саме оболонка *MongoDB*, *MongoDB Compass* і *Robo3T*, можуть виконувати запити та працювати з інформацією так само, як і з нативною *MongoDB*. Вважається, що *API* для *MongoDB* – чудовий вибір, якщо потрібно застосовувати екосистему *MongoDB* і відповідні навички без шкоди для використання функцій *Azure Cosmos DB*.

Azure Cosmos DB для *PostgreSQL* – це керована служба для запуску *PostgreSQL* у будь-якому масштабі з суперпотужністю розподілених таблиць із відкритим кодом *Citus*. Він зберігає інформацію або на одному вузлі, або в конфігурації з кількома вузлами. *Azure Cosmos DB* для *PostgreSQL* побудовано на основі власного *PostgreSQL*, а не на форку *PostgreSQL*, і дає змогу обрати будь-яку основну версію бази даних, що підтримується спільнотою *PostgreSQL*. Вважається, що він ідеально підходить для запуску одновузлової бази даних із багатим індексуванням, геопросторовими можливостями та підтримкою *JSONB*. Якщо в майбутньому знадобиться більша продуктивність, рекомендується додавати вузли до кластера без простою системи.

API Azure Cosmos DB для *Cassandra* зберігає дані в схемі, орієнтованій на стовпці. *Apache Cassandra* пропонує високорозподілений, горизонтально масштабований підхід до зберігання великих обсягів інформації, одночасно пропонуючи гнучкий підхід до схеми, орієнтованої на стовпці. *API* для *Cassandra* в *Azure Cosmos DB* відповідає цій філософії наближення до розподілених баз даних *NoSQL*. *API* для *Cassandra* є дротовим протоколом,

сумісним із рідним *Apache Cassandra*. Фахівці радять розглянути *API* для *Cassandra*, якщо хочете отримати переваги від гнучкості та повністю керованого характеру *Azure Cosmos DB*. Рекомендується використовувати клієнтські драйвери *Apache Cassandra* для підключення до *API* для *Cassandra*, що дає змогу взаємодіяти з інформацією за допомогою мови запитів *Cassandra (CQL)* і таких інструментів, як оболонка *CQL*, клієнтські драйвери *Cassandra*. *API* для *Cassandra* наразі підтримує лише сценарії *OLTP*. Розробники також рекомендують використовувати унікальні функції *Azure Cosmos DB*, такі як канал змін.

API Azure Cosmos DB для *Gremlin* дає змогу користувачам створювати запити на графіки та зберігає дані як ребра та вершини. Фахівці пропонують застосовувати *API* для *Gremlin* для сценаріїв:

- залучення динамічних даних;
- залучення даних зі складними зв'язками;
- залучення даних, надто складних для моделювання, за допомогою реляційних баз даних;
- якщо ви хочете використовувати наявну екосистему та навички *Gremlin*.

API для *Gremlin* поєднує потужність алгоритмів графічної бази даних із високомасштабованою керованою інфраструктурою. *API* для *Gremlin* наразі підтримує лише сценарії *OLTP* і ґрунтується на структурі графових обчислень *Apache TinkerPop*. *API* для *Gremlin* використовує ту саму мову запитів *Graph* для прийому та запиту інформації. Він застосовує стратегію розділу *Azure Cosmos DB* для виконання операцій читання / запису з механізмом бази даних *Graph*. *API* для *Gremlin* також працює з *Apache Spark* і *GraphFrames* для сценаріїв складних аналітичних графіків.

API Azure Cosmos DB for Table зберігає інформацію у форматі "ключ / значення". Вважається, що якщо використовувати сховище *Azure Table*, то можна спостерігати певні обмеження щодо затримки, масштабування, пропускну здатності, глобального розподілу, керування індексами, низької продуктивності запитів. *API Azure Cosmos DB for Table* долає ці обмеження, тому рекомендується перенести свою програму, якщо хочете скористатися перевагами *Azure Cosmos DB*. *API* для таблиць підтримує лише сценарії *OLTP*. Програми, написані для сховища таблиць *Azure*, можна перенести на *API* для таблиць із незначними змінами коду та скористатися перевагами преміум-можливостей.

На жаль, рекомендації з документації того чи іншого *API* не завжди покривають важливі для розробників питання, від яких залежатиме вибір програмного підходу. Тому результати досліджень щодо порівняння програмних інтерфейсів і сформовані рекомендації будуть корисні для розробників.

Метою цієї роботи є формулювання більш ефективних рекомендацій щодо вибору методів програмної реалізації *Cosmos DB API* на платформі *.NET* на базі аналізу результатів досліджень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- на основі аналізу наявних *Cosmos DB API* та багатокритеріального прийняття рішення обрати найкращі для подальшого дослідження *API*;
- проаналізувати обрану предметну сферу, а саме електронну комерцію, і спроектувати відповідну логічну модель бази даних;
- розробити програмні рішення для кожного з досліджуваних *Cosmos DB API*;
- налаштувати середовище *Azure* для роботи з *Cosmos DB*, провести експерименти, здобуті результати проаналізувати та сформулювати рекомендації щодо використання кожного з досліджуваних підходів програмної реалізації.

Матеріали й методи

На основі проведеного аналізу наявних *Cosmos DB API* сформульовано багатокритеріальне завдання прийняття рішень із вибору найкращих для дослідження *API*. Множина альтернатив для цього завдання складається з таких варіантів: *API for NoSQL*, *API for MongoDB*, *API for PostgreSQL*, *API for Apache Cassandra*, *API for Apache Gremlin* та *API for Table* [9].

Для обґрунтованого вибору сформовано множину критеріїв, що дає змогу з різних поглядів

оцінити варіанти *API* та обрати найкращі для дослідження їх застосування на платформі *.NET*, а саме:

- ступінь підтримки платформи *.NET* – важливо, щоб досліджуваний програмний інтерфейс мав підтримку цієї платформи;
- частота оновлення *API* – цей критерій показує, наскільки швидко нові функції *Cosmos DB* будуть доступні на тому чи іншому *API*;
- доступність функцій БД через код – цей критерій показує наявність функціоналу зі створення бази даних та контейнерів із коду й перевірки, а також чи існує контейнер та інші налаштування;
- формат зберігання даних – за цим критерієм можна порівняти, у якому форматі зберігається інформація.

Сформовано шкалу оцінки кожного з обраних критеріїв. Під час цього було відкинуто критерій підтримки платформи *.NET*, бо кожен із розглянутих *API* підтримує цю технологію. Щоб оцінити корисність для дослідження відповідного *API*, використана лінійна адитивна згортка з ваговими коефіцієнтами. Нормовані значення за критеріями та результати обчислень за згортковою моделлю подано в табл. 1.

Під час визначення вагових коефіцієнтів найбільш впливовим є критерій доступності функцій БД через код (коефіцієнт 0.6). Це найбільш важливий параметр, оскільки визначає, яку кількість можливостей того чи іншого програмного інтерфейсу можна реалізувати саме через код. Критерій частоти оновлення *API* має коефіцієнт 0.2. Розробникам важливо використовувати нові функції обраної БД, тому переваги над іншими матиме *API*, у якому швидше доступні нові функції платформи. Критерій формату зберігання даних є достатньо важливим для розробників, тому йому також призначено коефіцієнт 0.2.

Таблиця 1. Вхідні нормовані дані та результати розрахунку корисності *API*

Лінійна адитивна згортка з ваговими коефіцієнтами				
API /критерій вибору	Частота оновлення API	Доступність функцій БД через код	Формат зберігання даних	Z*
API for NoSQL	1	1	1	0.36901789
API for MongoDB	0.666	0.333	1	0.179174099
API for PostgreSQL	0.666	0.333	0.75	0.164888385
API for Apache Cassandra	0.666	0.333	0.5	0.15060267
API for Apache Gremlin	0.666	0.333	0.25	0.136316956
API for Table	0.333	0.666	1	0.246674773
Вагові коефіцієнти	0.2	0.6	0.2	

Як показав багатокритеріальний вибір, *API for NoSQL* має найвищий показник корисності, а саме 0.36901789, та найбільше підходить для подальшого дослідження. Крім того, за цим *API* можемо реалізувати роботу з БД двома програмними способами: *Entity Framework Core Cosmos* та *CosmosClient*. Наступна *API for Table* є доволі особливим інтерфейсом, що найбільше підходить не для вирішення загальних завдань із БД, а, наприклад, для переносу архітектури в *Cosmos DB* з *Azure Table*. Тому прийнято рішення не розглядати його під час дослідження. Для порівняння обрано *API for MongoDB* з наступною корисністю 0.179174099. *MongoDB* – це БД, що активно використовується для створення високодоступних і масштабованих інтернет-застосунків. Завдяки гнучкому підходу до структури він популярний серед команд розробників. *API for MongoDB* – це гарна альтернатива для порівняння з *API for NoSQL*.

У процесі порівняння та вибору *Cosmos DB API* для дослідження було обрано *API for NoSQL* та *API for MongoDB*. На платформі *.NET* [10] програмно реалізувати *API for NoSQL* можна двома способами: використовуючи *Entity Framework Core Cosmos* та *Cosmos Client* системний клас. Тому ці дві реалізації досліджувалися й порівнювалися як окремі.

Предметною сферою для вивчення була обрана електронна комерція (*e-commerce*), а саме інтернет-магазин одягу. Оскільки дослідження передбачає експерименти із запитам та вимірювання відповідних показників їх продуктивності, не було потреби створювати реалістично модель БД [11]. За основу взято спрощену концептуальну модель для сфери діяльності інтернет-магазину одягу, що містить такі сутності, як *Product* (товар), *Order* (замовлення), *Payment* (платіж) [12].

У сутності *Product* зберігається інформація про всі товари, кожен має власну назву, опис і назву виробника, а також унікальний ідентифікатор – *id* товару. У сутності *Order* є інформація про замовлення, кожне з яких має унікальний ідентифікатор *id*, дату замовлення, список товарів, доданих до замовлення, та загальну вартість замовлення. У сутності *OrderItem* зберігаються відомості про позиції товарів кожного замовлення та міститься, крім атрибутів для моделювання зв'язку, кількість товару в замовленні. У сутності *Payment* є інформація про оплату замовлення. Ця сутність має поле для зберігання вартості замовлення та дати оплати.

На основі побудованої *ER*-діаграми розроблено логічну модель БД для СУБД *MongoDB* (рис. 1).

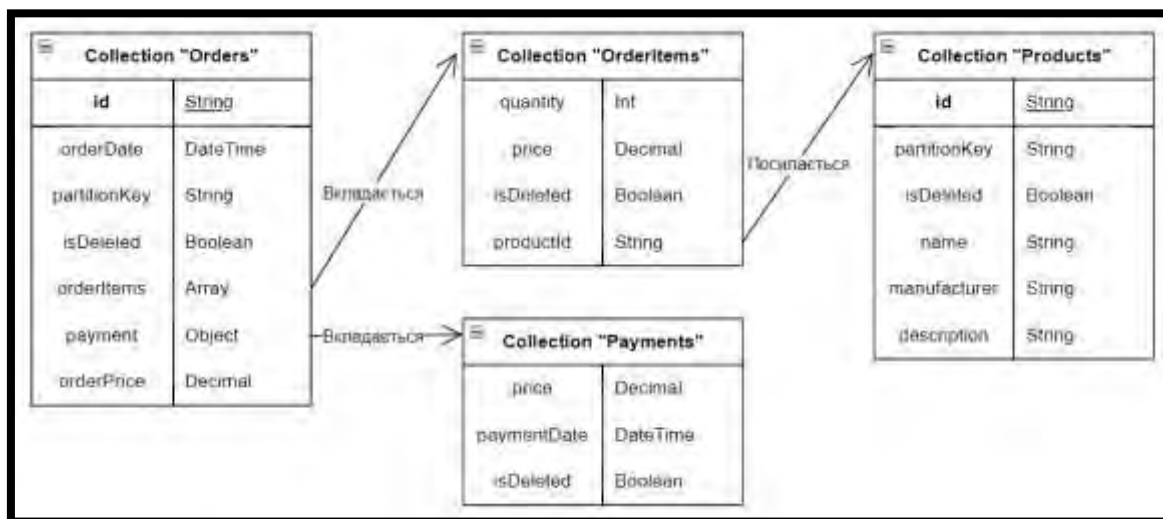


Рис. 1. Логічна модель БД для *MongoDB*

У *MongoDB* дані зберігаються в колекціях (*collections*), де є документи (*documents*) – об'єкти у форматі *BSON*, що містять ключі та значення [4]. Ключі відповідають полям документа, а значення – їх значенням. *BSON* (*Binary JSON*) – це бінарний формат серіалізації *JSON*, що забезпечує більш

компактне зберігання інформації та дає змогу ефективніше використовувати ресурси [13].

Для моделювання логічної структури даних у *MongoDB* застосовано додаткові поля, необхідні для програмної реалізації роботи з колекціями *Cosmos DB*: *PartitionKey* та *isDeleted*. *PartitionKey* необхідний

Cosmos DB для оптимізації запитів, а властивість *isDeleted* – для реалізації м'якого вилучення [14].

Для дослідження продуктивності реалізації обрано такі важливі для будь-якої бази даних параметри, як швидкість виконання *CRUD*-операцій, що використовуються найчастіше. Отже, для дослідження було розроблено такі запити до бази даних:

– *INSERT*-запит на створення нового замовлення типу «*INSERT INTO Orders ("id", "isDeleted", "orderDate", "orderPrice", "partitionKey", "orderItems", "payment") VALUES ("b0842587-42e7-4b5f-ab17-c09ca1c9629f", "false", "2023-04-27T20:16:34.4468614Z", "100", "100", [{ "price": 50, "productId": "d489b6b9-5157-408f-a249-fcfc33493c08", "quantity": 1 }, { "price": 25, "productId": "f88a4167-b622-4b7c-9770-a39d4aa2de85", "quantity": 2 }], { "paymentDate": "2023-04-27T20:16:12.0488881Z", "price": 100 });»;*

запити такого типу дають змогу дослідити швидкість створення нових замовлень;

– *SELECT*-запит № 1 на отримання замовлення за певним *PartitionKey* типу «*SELECT * FROM Orders WHERE Orders.partitionKey = "100"»*);»; запити такого типу дають змогу дослідити швидкість повернення всіх замовлень, що мають спільний ключ розділу *Cosmos DB*;

– *SELECT*-запит № 2 на отримання замовлення за певним *id* типу «*SELECT * FROM Orders WHERE Orders.id = "b0842587-42e7-4b5f-ab17-c09ca1c9629f"»*);»; запити такого типу дають змогу дослідити швидкість отримання замовлення за *id* без оптимізації *PartitionKey*;

– *UPDATE*-запит на оновлення полів сутності замовлення: «*UPDATE Orders SET "orderDate" = "2023-04-28T11:15:49.9163777Z" WHERE Orders.id = "b0842587-42e7-4b5f-ab17-c09ca1c9629f";»*);»; запити такого типу дають змогу дослідити швидкість оновлення сутності замовлення;

– *DELETE*-запит на вилучення сутності замовлення з бази даних типу «*DELETE FROM Orders WHERE Orders.id = "b0842587-42e7-4b5f-ab17-c09ca1c9629f";»*);»; запити такого типу дають змогу дослідити швидкість вилучення запису з БД;

– *SOFT DELETE*-запит на безпечне вилучення замовлення з бази даних типу «*UPDATE Orders SET "isDeleted" = "true" WHERE Orders.id = "b0842587-42e7-4b5f-ab17-c09ca1c9629f";»*);»; запити такого типу дають змогу дослідити швидкість м'якого вилучення запису в БД та порівняти її з *DELETE*-запитом.

На основі аналізу підходів до оцінювання продуктивності БД і програмних систем загалом [15]

обрано такі показники для порівняння перелічених операцій:

- швидкість виконання запиту в мілісекундах;
- кількість байтів, витрачених сервером на таку операцію;
- кількість витрачених ресурсів RU на виконання операції в БД.

Database throughput RU (Request Units) – це одиниця виміру продуктивності, що використовується в *Azure Cosmos DB*. Кожна дія, що виконується в *Cosmos DB*, потребує певної кількості RU [14].

Окремо було вирішено дослідити, чи можливо за умови застосування того чи іншого програмного підходу створювати базу даних або контейнер, а також перевіряти, чи база даних або контейнер уже створені. Показником для цього порівняння буде прапорець *TRUE* чи *FALSE*: можливо чи ні створити з коду базу даних або контейнер.

Також досліджено складність реалізації для кожного з підходів способом аналізу питання: наскільки багато коду потрібно написати для його роботи. Показником для цього порівняння є кількість рядків коду для кожної з реалізацій.

Для розроблення коду реалізації програмних інтерфейсів *Cosmos DB* використовувався підхід об'єктно орієнтованого програмування [15]. Отже, для кожної колекції логічної моделі БД було спроектовано відповідні класи й описано їх поведінку (рис. 2). Колекції *Orders* та *Products* мають низку схожих властивостей, а саме унікальний ключ кожного запису (*string Id*) та булеве поле для відображення, чи вилучений запис (*bool IsDeleted*). Ці властивості було винесено в базовий абстрактний клас (*class EntityBase*), що дало змогу далі реалізувати підхід безпечного (м'якого) вилучення (*soft delete*). М'яке вилучення може покращити продуктивність, а також відновлювати вилучену інформацію.

Ключ розділу (*string PartitionKey*) необхідний для оптимізації запитів. *Cosmos DB* дає змогу групувати набір елементів або даних у колекції за подібною властивістю, визначеною ключем розділу. Ключі розділу є основним елементом для ефективного розподілу даних у різних логічних і фізичних наборах, щоб запити, які виконуються до БД, завершувалися якомога швидше. Важливо обрати ключ розділу на етапі проектування програм, оскільки не можна змінити ключ розділу після створення контейнера. Зробивши властивість *PartitionKey* абстрактною в базовому класі, маємо змогу перевизначити її по-різному в класах-спадкоємцях.



Рис. 2. Діаграма базових класів для обраної предметної сфери

Для того, щоб дослідження різних програмних реалізацій було достовірним, розроблено основні класи, які виконують параметри підключення та налаштування БД, що мають однакову структуру, а саме класи *CosmosDbSettings*, *CosmosDbExtensions* та *CosmosDbInitializer* (рис. 3).

За допомогою класу *CosmosDbSettings* реалізовано можливість конфігурувати програму, задавати такі параметри, як рядок підключення до БД (*ConnectionString*), назва БД (*DatabaseName*), список контейнерів (*ContainerNames*) та окремо назви для кожного з необхідних контейнерів, у нашому випадку для контейнерів *Orders* та *Products* (*OrdersContainerName*, *ProductsContainerName*).

Клас *CosmosDbExtensions* містить методи розширення для конфігурації системних класів для роботи з *CosmosDb*. Метод *ConfigureCosmosClient()* задає конфігурацію для підключення до БД, використовуючи параметри з класу *CosmosDbSettings*, та налаштовує параметри серіалізації об'єктів, після чого реєструє клас, що відповідає за роботу з БД, у контейнері інверсії залежностей.

Клас *CosmosDbInitializer* необхідний для того, щоб перевірити, чи створена БД та всі необхідні контейнери під час підключення до *Azure*, та створити їх, якщо необхідно.

Далі ці класи викликаються в основному класі *Program*, спочатку метод конфігурації, потім метод

ініціалізації БД. Розроблений клас *Program.cs* конфігурує та запускає вебзастосунок. Він є однаковим для кожної з програмних реалізацій завдяки тому, що було інкапсульовано логіку підключення до БД в описаних вище методах розширення. Ці методи лише мають різну назву для кожного з проєктів:

- *ConfigureCosmosClient()* та *InitializeCosmosClient()* для *Cosmos Client*;
- *ConfigureCosmosEpf()* та *InitializeCosmosEpf()* для *Entity Framework Core Cosmos* [16];
- *ConfigureCosmosMongoDb()* та *InitializeCosmosMongoDb()* для *MongoDB*.

Для того, щоб кожна з програм мала однаковий інтерфейс, у процесі проведення експериментів було розроблено два контролери для роботи з кожною колекцією *OrdersController* та *ProductsController* (рис. 4). Ці контролери є реалізацією *RESTful API* – архітектурного стилю інтерфейсу застосунку (*API*), що використовує запити *HTTP* для доступу до інформації та її використання. Цю інформацію можна застосовувати для типів даних *GET*, *PUT*, *POST* і *DELETE*, що стосуються читання, оновлення, створення та вилучення операцій щодо ресурсів. Кожен із них має методи для виконання описаних запитів до БД: *Create()*, *GetByPartitionKey()*, *GetById()*, *Update()*, *Delete()*, *SoftDelete()*.



Рис. 3. Основні класи для роботи з базою даних

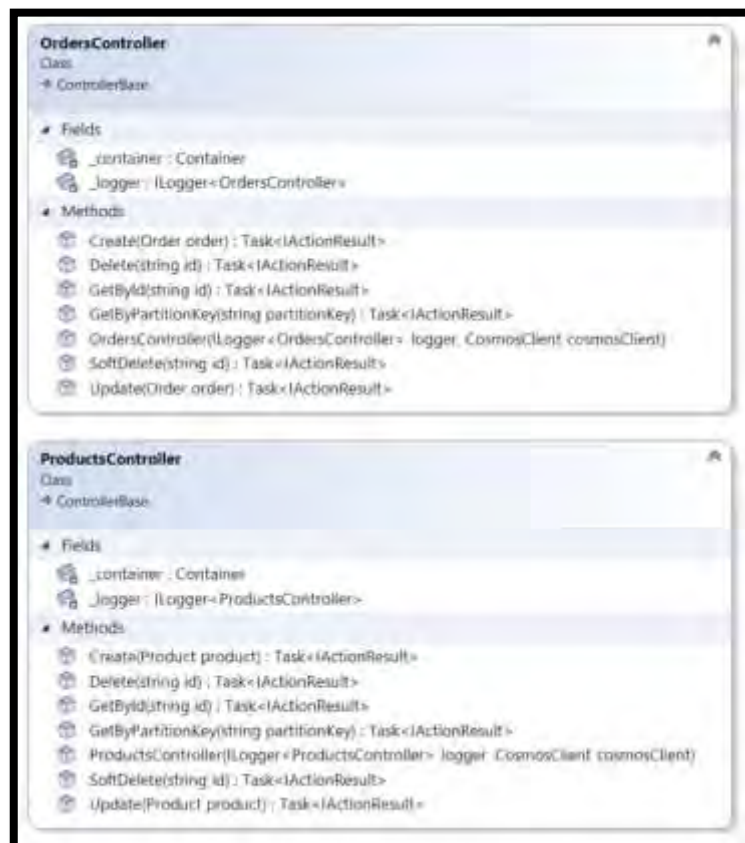


Рис. 4. Класи контролерів для роботи з колекціями

Кожна програмна реалізація повинна мати налаштування *Swagger* – набір інструментів, що дає змогу автоматично описувати *API* на основі коду, який нам знадобиться для досліджень. Щоб було зручно вимірювати показники для запитів, вирішено використовувати *Swagger OpenAPI*, який подає опис усіх методів контролера та має зручний інтерфейс для введення даних, що будуть відправлені на сервер.

Результати досліджень та їх обговорення

Під час дослідження виконувалися серії запитів запланованих типів і розраховувалися середні значення за обраними показниками, а саме: швидкістю виконання запитів, кількістю витраченої програмою пам'яті на виконання запиту та кількістю RU з боку БД.

Результати вимірювання за показниками для "INSERT-запит" зведені в табл. 2. Бачимо, що запити

на створення замовлення найбільш ефективно та швидко виконало *MongoDB API*. Було витрачено менше пам'яті та RU. Отже, такий запит коштуватиме дешевше. Це пов'язано з тим, що *MongoClient* не повертає відповідь від сервера, на відміну від *CosmosClient* та *EF Core Cosmos*.

Результати вимірювання для "SELECT-запит № 1" зведено в табл. 3, для "SELECT-запит № 2" – у табл. 4.

З аналізу виконання запитів на отримання замовлення за *PartitionKey* та *id* можемо спостерігати ефективність *Entity Framework Core Cosmos*, що краще оптимізований для таких операцій. Якщо порівнювати кількість RU, можемо побачити, що *CosmosClient* та *EF Core Cosmos* мають приблизно однакову вартість виконання запиту, а *MongoClient*, навпаки, програє за цим параметром.

Результати вимірювання для "UPDATE-запит" зведено в табл. 5, для "SOFT DELETE-запит" – у табл. 6.

Таблиця 2. Результати виконання запитів на створення замовлення

API / Показники	Швидкість виконання запиту (мс)	Кількість витраченої пам'яті (Byte)	Вартість виконання (RU)
Cosmos DB API for NoSQL (Cosmos Client)	48.55	27776	10.67
Cosmos DB API for NoSQL (Entity Framework Core Cosmos)	54.22	51999	10.67
Cosmos DB API for MongoDB (Mongo Client)	48	17232	9.05

Таблиця 3. Результати виконання запитів на отримання замовлень за полем *PartitionKey*

API / Показники	Швидкість виконання запиту (мс)	Кількість витраченої пам'яті (Byte)	Вартість виконання (RU)
Cosmos DB API for NoSQL (Cosmos Client)	110.33	86605	3.12
Cosmos DB API for NoSQL (Entity Framework Core Cosmos)	2.77	8453	3.22
Cosmos DB API for MongoDB (Mongo Client)	64.55	35149	7.17

Таблиця 4. Результати виконання запитів на отримання замовлення за *id*

API / Показники	Швидкість виконання запиту (мс)	Кількість витраченої пам'яті (Byte)	Вартість виконання (RU)
Cosmos DB API for NoSQL (Cosmos Client)	86.44	54949	2.83
Cosmos DB API for NoSQL (Entity Framework Core Cosmos)	55.44	29012	2.83
Cosmos DB API for MongoDB (Mongo Client)	130.77	25977	3.11

Таблиця 5. Результати виконання запитів на оновлення замовлення

API / Показники	Швидкість виконання запиту (мс)	Кількість витраченої пам'яті (Byte)	Вартість виконання (RU)
Cosmos DB API for NoSQL (Cosmos Client)	49.11	42915	10.67
Cosmos DB API for NoSQL (Entity Framework Core Cosmos)	106.77	21033	10.67
Cosmos DB API for MongoDB (Mongo Client)	179.11	32885	11.29

Таблиця 6. Результати виконання запитів на м'яке вилучення замовлення

API / Показники	Швидкість виконання запиту (мс)	Кількість витраченої пам'яті (Byte)	Вартість виконання (RU)
Cosmos DB API for NoSQL (Cosmos Client)	47.88	58895	10.67
Cosmos DB API for NoSQL (Entity Framework Core Cosmos)	104	28076	10.67
Cosmos DB API for MongoDB (Mongo Client)	108.77	28662	11.29

Аналізуючи результати запитів на оновлення замовлення та м'яке вилучення, спостерігаємо, що *CosmosClient* майже удвічі швидше виконує цю операцію, на відміну від *EF Core Cosmos* та *MongoClient*, але витрачає на це майже удвічі більше пам'яті. М'яке вилучення – це той самий запит на оновлення сутності зі зміною лише одного поля. З погляду ефективності в RU перші два підходи на рівних із показником у 10.67 RU проти 11.29 RU у *MongoClient*.

Результати вимірювання для "DELETE-запит" подано в табл. 7. Аналіз запитів на вилучення замовлення показав, що *EF Core Cosmos* та *Mongo Client* виконують цю операцію майже удвічі швидше, але витрачають на це значно більше пам'яті. *MongoClient* робить вилучення за 7.05 RU проти 10.67 RU у *CosmosClient* та *EF Core Cosmos*.

Отже, що кожен із розглянутих методів має свої переваги й недоліки, і вибір залежатиме від конкретних завдань розробника. Проте можна запропонувати деякі рекомендації:

– якщо говоримо про вартість запитів до БД або необхідність оптимізувати витрати на БД, а водночас є багато запитів на створення та вилучення записів, то краще обрати реалізацію

Cosmos DB API for MongoDB через *Mongo Client*, бо цей програмний підхід використовує меншу кількість RU на виконання таких запитів;

– якщо ж частіше застосовуються операції оновлення та отримання даних, то однаково економними, але кращими, порівняно з *Mongo Client*, будуть *Cosmos DB API for NoSQL (Cosmos Client* та *Entity Framework Core Cosmos)*;

– якщо необхідно багато та швидко читати інформацію з БД, потрібно використовувати *Cosmos DB API for NoSQL* з *Entity Framework Core Cosmos*, що може вивантажувати контекст БД в пам'ять та швидко оброблювати запити;

– якщо існують обмеження для програми по пам'яті, не рекомендується застосовувати *Entity Framework Core Cosmos*, бо він потребує багато пам'яті для роботи з контекстом БД;

– якщо необхідна оптимізація налаштування швидкості отримання певної групи об'єктів, потрібно налаштувати ключ розділу *Cosmos DB*, за допомогою якого запити на отримання певного розділу оптимізуються; найкраще цю оптимізацію можна спостерігати для *Entity Framework Core Cosmos* для *SELECT*-запиту за *PartitionKey*.

Таблиця 7. Результати виконання запитів на вилучення замовлення

API / Показники	Швидкість виконання запиту (мс)	Кількість витраченої пам'яті (Byte)	Вартість виконання (RU)
Cosmos DB API for NoSQL (Cosmos Client)	50.11	54949	10.67
Cosmos DB API for NoSQL (Entity Framework Core Cosmos)	106	18560	10.67
Cosmos DB API for MongoDB (Mongo Client)	99.22	31520	7.05

Щодо показника кількості коду, необхідно враховувати, що для невеликих проєктів вибір якогось із підходів не буде мати значних переваг для кожного з API. *Entity Framework Core Cosmos* потребує найменше коду для роботи з БД, але найбільше – для конфігурації підключення до БД. Саме тому ці переваги будуть помітні лише у великих проєктах зі складною структурованою логікою.

Висновки й перспективи подальшого розвитку

У роботі з погляду продуктивності досліджено методи програмної реалізації *Cosmos DB API* на платформі .NET на прикладі *Cosmos DB API for NoSQL* та *Cosmos DB API for MongoDB*. Проведено серію експериментів із вимірюваннями за показниками продуктивності виконання запитів до БД.

З огляду на проведений аналіз методів програмної реалізації *Cosmos DB API* запропоновано програмні рішення на основі використання *CosmosClient*, *Entity Framework Core* для *Cosmos DB API for NoSQL* та на основі *MongoClient* для *Cosmos DB API for MongoDB*. Для проведення експериментів спроектовано логічну модель БД у сфері електронної комерції для СУБД *MongoDB* та набір запитів на виконання *CRUD*-операцій, продуктивність яких і було досліджено.

Під час експериментів використано показники щодо швидкості виконання запитів (мс), кількості витраченої пам'яті на виконання запиту (*byte*), вартості запитів у *RU* та кількості коду, що необхідно написати.

Дослідження показало, що жоден із застосованих методів програмної реалізації не можна назвати однозначно найкращим.

Показник кількості коду, що написано під час реалізації, може братися до уваги лише в процесі розроблення великих проєктів зі складною структурованою логікою.

Під час обрання методу реалізації *Cosmos DB API* варто звертати увагу на такі фактори, як вартість запитів до БД, частота застосування тих чи інших запитів та обмеження пам'яті програми.

На основі результатів дослідження сформовано рекомендації щодо використання розглянутих методів. Ці рекомендації можуть бути застосовані для розроблення програмних систем на платформі *.NET* із використанням *Cosmos DB API*.

Список літератури

1. Filatov V., Semenets V. Methods for Synthesis of Relational Data Model in Information Systems Reengineering Problems. *International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T). IEEE*. 2018. URL: https://www.researchgate.net/publication/331418031_Methods_for_Synthesis_of_Relational_Data_Model_in_Information_Systems_Reengineering_Problems
2. Smelyakov K., Prokopenko O., Chupryna A. Object-Based Image Comparison Algorithm Development for Data Storage Management Systems. *CEUR Workshop Proceedings*, 2022. № 3171. P. 1251–1266. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3171/paper92.pdf>
3. Mazurova, O., Naboka, A., Shirokopetleva, M. Research of ACID transaction implementation methods for distributed databases using replication technology. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, № 2 (16). 2021. P. 19–31. DOI: 10.30837/ITSSI.2021.16.019
4. Mazurova O., Syvolovskyi I., Syvolovska O. NOSQL database logic design methods for MONGODB and NEO4J. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, № 2 (20), 2022. P. 52–63. DOI: 10.30837/ITSSI.2022.20.052.
5. Sahatqija K., Ajdari J., Zenuni X., Raufi B., Ismaili F. Comparison between relational and NOSQL databases. *41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*. 2018. P. 216–221. DOI: <https://doi.org/10.23919/mipro.2018.8400041>
6. Maran M., Paniavin N., Poliushkin I. Alternative Approaches to Data Storing and Processing. *V International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino)*. 2020. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/inforino48376.2020.9111708>
7. Falatiuk H., Shirokopetleva M., Dudar Z. Investigation of Architecture and Technology Stack for e-Archive System. *IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*. 2019. P. 229–235. DOI: 10.1109/PICST47496.2019.9061407
8. Gomes C., Borba E., Tavares E., Junior M. N. de O. Performability Model for Assessing NoSQL DBMS Consistency. *IEEE International Systems Conference (SysCon)*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/syscon.2019.8836757>
9. Kuzochkina A., Shirokopetleva M., Dudar Z. Analyzing and Comparison of NoSQL DBMS. *International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*. 2018. P. 560–564. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632133
10. Bai Y. SQL Server Database Programming with Visual Basic.NET: Concepts, Designs and Implementations. 2020. 688 p, URL: <https://www.wiley.com/en-ie/SQL+Server+Database+Programming+with+Visual+Basic+NET:+Concepts,+Designs+and+Implementations-p-9781119608608>
11. Renée, M. P., Teate SQL for Data Scientists: A Beginner's Guide for Building Datasets for Analysis. 2021. 288 p, URL: <https://www.wiley.com/en-us/SQL+for+Data+Scientists%3A+A+Beginner%27s+Guide+for+Building+Datasets+for+Analysis-p-9781119669364>
12. Peretiatio M., Shirokopetleva M., Lesna N. Research of methods to support data migration between relational and document data storage models. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. № 2 (20). 2022. P. 64–74. DOI: 10.30837/ITSSI.2022.20.064
13. Palanisamy S., SuvithaVani P. A survey on RDBMS and NoSQL Databases MySQL vs MongoDB. *Conference: 2020 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*. 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/341812161_A_survey_on_RDBMS_and_NoSQL_Databases_MySQL_vs_MongoDB

14. Ponniah P. Database Design and Development: An Essential Guide for IT Professionals. 2003. 768 p. URL: http://www.sbu.unicamp.br/bases-nfs/b131/lista_131_4.xlsx
15. Gruzdo I., Kyrychenko I., Tereshchenko G., Shandzhe N. Metrics applicable for evaluating software at the design stage. *5th International Conference on Computational Linguistics and In-telligent Systems (COLINS-2021)*. Kharkiv, Ukraine, April 22–23, 2021. CEUR Workshop Proceedings, 2021, Volume I. P. 916–936. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2870/paper69.pdf>
16. Perkins B., Panek W. Microsoft Azure Architect Technologies and Design Complete Study Guide: Exams AZ-303 and AZ-304. 2020. 768p. URL: <https://www.wiley.com/en-ba/Microsoft+Azure+Architect+Technologies+and+Design+Complete+Study+Guide:+Exams+AZ+303+and+AZ+304-p-9781119559580>

References

1. Filatov, V., Semenets, V. (2018), "Methods for Synthesis of Relational Data Model in Information Systems Reengineering Problems", *International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), IEEE*, available at: https://www.researchgate.net/publication/331418031_Methods_for_Synthesis_of_Relational_Data_Model_in_Information_Systems_Reengineering_Problems
2. Smelyakov, K., Prokopenko, O., Chupryna, A. (2022), "Object-Based Image Comparison Algorithm Development for Data Storage Management Systems", *CEUR Workshop Proceedings*, No. 3171, P. 1251–1266, available at: <https://ceur-ws.org/Vol-3171/paper92.pdf>
3. Mazurova, O., Naboka, A., Shirokopetleva, M. (2021) "Research of ACID transaction implementation methods for distributed databases using replication technology", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, No. 2 (16), P. 19–31. DOI: 10.30837/ITSSI.2021.16.019
4. Mazurova, O., Syvolovskiy, I., Syvolovska, O. (2022) "NoSQL database logic design methods for MONGODB and NEO4J", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, No. 2 (20), P. 52–63. DOI: 10.30837/ITSSI.2022.20.052
5. Sahatqija, K., Ajdari, J., Zenuni, X., Raufi, B., Ismaili, F., (2018), "Comparison between relational and NoSQL databases", *41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, P. 216–221. DOI: <https://doi.org/10.23919/mipro.2018.8400041>
6. Maran, M., Paniavin, N., Poliushkin, I. (2020), "Alternative Approaches to Data Storing and Processing", *V International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino)*, P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/inforino48376.2020.9111708>
7. Falatiuk, H., Shirokopetleva, M., Dudar, Z. (2019), "Investigation of Architecture and Technology Stack for e-Archive System", *IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*, P. 229–235. DOI: 10.1109/PICST47496.2019.9061407
8. Gomes, C., Borba, E., Tavares, E., Junior, M. N. de O. (2019), "Performability Model for Assessing NoSQL DBMS Consistency", *IEEE International Systems Conference (SysCon)*, DOI: <https://doi.org/10.1109/syscon.2019.8836757>
9. Kuzochkina, A., Shirokopetleva, M., Dudar, Z. (2018), "Analyzing and Comparison of NoSQL DBMS", *International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology PIC S&T*, P. 560–564. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632133
10. Bai, Y., (2020), "SQL Server Database Programming with Visual Basic.NET: Concepts, Designs and Implementations". 688 p, available at: <https://www.wiley.com/en-ie/SQL+Server+Database+Programming+with+Visual+Basic+NET:+Concepts,+Designs+and+Implementations-p-9781119608608>
11. Renée, M. (2021), *Teate SQL for Data Scientists: A Beginner's Guide for Building Datasets for Analysis*. 288 p. available at: <https://www.wiley.com/en-us/SQL+for+Data+Scientists%3A+A+Beginner%27s+Guide+for+Building+Datasets+for+Analysis-p-9781119669364>
12. Peretiak, M., Shirokopetleva, M., Lesna, N. (2022) "Research of methods to support data migration between relational and document data storage models", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, No. 2 (20), P. 64–74. DOI: 10.30837/ITSSI.2022.20.064
13. Palanisamy, S., SuvithaVani, P. (2020), "A survey on RDBMS and NoSQL Databases MySQL vs MongoDB", *International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*, available at: https://www.researchgate.net/publication/341812161_A_survey_on_RDBMS_and_NoSQL_Databases_MySQL_vs_MongoDB
14. Ponniah, P. (2003), *Database Design and Development: An Essential Guide for IT Professionals*. 768 p, available at: http://www.sbu.unicamp.br/bases-nfs/b131/lista_131_4.xlsx
15. Gruzdo, I., Kyrychenko, I., Tereshchenko, G., Shandzhe, N. (2021), "Metrics applicable for evaluating software at the design stage", *5th International Conference on Computational Linguistics and In-telligent Systems (COLINS-2021)*, Kharkiv, Ukraine, April 22–23, CEUR Workshop Proceedings, 2021, Volume I, P. 916–936, available at: <https://ceur-ws.org/Vol-2870/paper69.pdf>
16. Perkins, B., Panek, W. (2020), "Microsoft Azure Architect Technologies and Design Complete Study Guide: Exams AZ-303 and AZ-304". 768p. available at: <https://www.wiley.com/en-ba/Microsoft+Azure+Architect+Technologies+and+Design+Complete+Study+Guide:+Exams+AZ+303+and+AZ+304-p-9781119559580>

Відомості про асмпіє / About the Authors

Мазурова Оксана Олексіївна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри програмної інженерії, Харків, Україна; e-mail: oksana.mazurova@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3715-3476>

Андрущенко Микола Олександрович – Харківський національний університет радіоелектроніки, магістр спеціальності 121 "Інженерія програмного забезпечення", Харків, Україна; e-mail: mykola.andrushchenko@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-6866-1065>

Широкопетлева Марія Сергіївна – Харківський національний університет радіоелектроніки, старший викладач кафедри програмної інженерії, Харків, Україна; e-mail: marija.shirokopetleva@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7472-6045>

Mazurova Oksana – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor at the Department of Software Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Andrushchenko Mykola – Kharkiv National University of Radio Electronics, Master of Specialty 121 "Software Engineering", Kharkiv, Ukraine.

Shirokopetleva Mariya – Kharkiv National University of Radio Electronics, Senior Lecturer at the Department of Software Engineering, Kharkiv, Ukraine.

RESEARCH OF METHODS OF SOFTWARE IMPLEMENTATION OF THE COSMOS DB API ON THE .NET PLATFORM

Large number of developers use the .NET platform to create applications that work with databases today. In turn, Cosmos DB is becoming an increasingly popular choice as a NoSQL storage for such databases. Cosmos DB is a flexible and scalable system, and the correct selection of the appropriate API during software implementation can significantly affect the performance of the programs themselves. Cosmos DB provides different APIs for working with different types of databases, such as SQL databases, running MongoDB or Cassandra. In turn, each of these APIs can be used using various methods of software implementation. **The subject** of research is software implementations on the .NET platform for various Cosmos DB APIs. When choosing the most suitable Cosmos DB API on the .NET platform, developers can be helped not only by the documentation, but also by the results of experimental studies of these APIs, which in turn will improve the quality of the code and the performance of the systems themselves. **The goal** of the work is to increase the efficiency of software development on the .NET platform. That use the Cosmos DB API, by developing a recommendation for the selection of software implementation methods for these APIs based on the results of their experimental research. **The task**: to investigate and compare the methods of software implementation of the Cosmos DB API through an experimental study of the performance of different types of queries on these software solutions; analyze the obtained results and develop recommendations for the use of methods. **Methods**: multi-criteria analysis of Cosmos DB API, logical data modeling, experimental research. **Results**: developed software solutions based on the use of CosmosClient, Entity Framework Core for Cosmos DB API for NoSQL and based on MongoClient for Cosmos DB API for MongoDB. A series of experiments and measurements of performance metrics for each of the software solutions were conducted, the obtained results were analyzed, and recommendations were offered for using the considered methods of software implementations of the Cosmos DB API on the .NET platform. **Conclusion**: In general, the choice of software approach depends on the specific task, but experiments have shown that CosmosDB API for NoSQL using CosmosClient is the best choice for small projects, and using the Entity Framework Core Cosmos is suitable for more complex projects with larger volumes of data and complex queries. If MongoDB is used in the project, then the corresponding solution using MongoClient is a better option than Cosmos DB API for NoSQL.

Keywords: DATABASE; COSMOS DB API; MONGODB; .NET; NOSQL.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Мазурова О. О., Андрущенко М. О., Широкопетлева М. С. Дослідження методів програмної реалізації *Cosmos DB API* на платформі *.NET*. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 2 (24). С. 118–130. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.118>

Mazurova, O., Andrushchenko, M., Shirokopetleva, M. (2023), "Research of methods of software implementation of the *Cosmos DB API* on the *.NET* platform", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (24), P. 118–130. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.118>

С. МЕРЗЛІКІН, С. БАБЕШКО

АНАЛІЗ КІБЕРБЕЗПЕКИ ВЕБОРІЄНТОВАНИХ ІНДУСТРІАЛЬНИХ *IoT*-СИСТЕМ

У сучасному світі питання кібербезпеки є одним із найважливіших, особливо в контексті динамічного розвитку веборієнтованих індустриальних систем Інтернету речей (*IoT*). **Предметом дослідження** є забезпечення кібербезпеки веборієнтованих індустриальних *IoT*-систем. **Мета статті** – аналіз наявних методів аналізу кібербезпеки, виявлення обмежень і формування вимог до нової концепції оцінювання, що передбачає шляхи усунення виявлених обмежень. **Завдання**, що розв'язуються: аналіз методів, засобів і технологій організації веборієнтованих індустриальних *IoT*-систем і питань забезпечення їх кібербезпеки. Застосовані **методи**: аналіз джерел, системний аналіз. **Результати дослідження**. Аналіз джерел показав, що проблема забезпечення кібербезпеки індустриальних *IoT*-систем є актуальною завдяки використанню в одній системі новітніх інформаційних технологій (ІТ) і традиційних операційних технологій (ОТ), таких як індустриальні протоколи тощо. Крім того, постійне зростання кількості та різновидів атак, спрямованих саме на індустриальні *IoT*-системи, є додатковими рушіями подальшого розвитку методів оцінювання та забезпечення кібербезпеки. Пропонується узагальнена концепція оцінювання та забезпечення кібербезпеки веборієнтованих індустриальних *IoT*-систем, яка містить етапи ідентифікації, аналізу, підвищення захищеності, виявлення та захисту. **Висновки**. Питання забезпечення кібербезпеки веборієнтованих індустриальних *IoT*-систем є надзвичайно актуальним, а наявні методи аналізу й засоби забезпечення не повністю задовольняють вимоги до таких систем. Саме тому розроблення та застосування запропонованої концепції оцінювання та забезпечення кібербезпеки дасть змогу суттєво вплинути на підвищення кібербезпеки індустриальних *IoT*-систем.

Ключові слова: кібербезпека; *IoT*; Індустрія 4.0; веборієнтовані системи; безпека вебзастосунків; виявлення вразливостей; виявлення вебатак.

1. Вступ

Парадигма Інтернету речей (*IoT*) є ключовим кроком на шляху задуму та створення сучасних систем. Об'єднання інтелектуальних пристроїв і серверів, підключених до великої кількості вузлів вимірювання та керування, надає потужну інфраструктуру для розроблення застосунків і систем, що підвищують інтелект і можливості користувачів. Сферами застосування *IoT* є електронна охорона здоров'я, розумне виробництво та автоматизація, розумні міста й багато інших.

Основною концепцією *IoT* є надшвидке наскрізне з'єднання між усіма пристроями, основане на таких досягненнях у мережах, як технологія *5G* і нова концепція *6G*. Інтеграція з іншими парадигмами й технологіями, зокрема *Cloud Computing*, *Fog Computing*, *DevOps*, і різноманітними програмними структурами, надала набір інструментів для створення безпрецедентно ефективних застосунків [1].

На сьогодні більшість систем *IoT*, а саме індустриальних *IoT* (*IIoT*), або інтенсивно використовують вебзаємодії, або принаймні мають певну частину, яка застосовує вебпротоколи та інструменти. Не тільки зручність цих систем

і програм, але й зв'язок між пристроями ґрунтується на вебтехнологіях і вебпротоколах завдяки стандартам *W3C* [2]. Вебзаємодії покладаються на протоколи *HTTP* [3] і *HTTPS* [4] і схему *REST* [5]. Крім того, більшість платформ *IoT* побудовано на вебінтерфейсі, що діє як централізована інформаційна панель і уніфікований сервер керування для зв'язку з пристроями системи.

Причина, чому безпека систем *IoT* дедалі більше порушується, залежить від їх природи. Вони містять значну кількість різнорідних пристроїв, таких як датчики, приводи, комп'ютерні вузли та сервери. Крім того, *IoT* сильно взаємопов'язані (зокрема мають доступ до інтернету) і покладаються на програмні платформи, здебільшого розроблені як ізольовані системи. Варто визнати, що впровадження вебтехнологій розширило зону атаки для кіберзлочинців.

Сучасні підходи до підвищення безпеки в *IoT* зосереджені на підмножині компонентів, що містять ці системи, здебільшого пов'язаних із криптографією, мережною передачею, маршрутизацією тощо. Питання безпеки програмного забезпечення також досліджено за допомогою методів аналізу коду, безпеки операційної системи, судової експертизи тощо.

Цього недостатньо в критичних підсистемах *IoT* / *IIoT*, оскільки помилка може мати катастрофічні наслідки. Однак існує складна рівновага:

– з одного боку, критично важливі системи *IoT* мають забезпечувати гарантії безпеки, щоб зменшити їх вразливість;

– з іншого – серверам *IoT* може знадобитися інтенсивне використання вебтехнологій, програмних інфраструктур і бібліотек, що дають змогу

розробникові створити функційні можливості, які інакше були б неможливі.

1.1. Мотивація

Різновидом *IoT* є промисловий (індустріальний) Інтернет речей (*Industrial Internet of Things, IIoT*). *IIoT* є сукупністю мереж і пов'язаного з ними виробничого обладнання, доповненого програмним забезпеченням (ПЗ) і вбудованими датчиками (рис. 1).



Рис. 1. Приклад індустріального Інтернету речей (*IIoT*) і технологій Індустрія 4.0

Системи, призначені для збирання інформації, обміну даними, можуть керуватися автоматично, без участі людини.

Індустріальний Інтернет речей створений як загальна концепція застосування Інтернету речей (*IoT*) до промислового сектора. Ключовою технологією концепції Індустрія 4.0 вважається Інтернет речей, що більше зосереджена на ефективності промислових процесів.

IIoT містить усі аспекти промислових операцій і спрямоване не тільки на ефективність процесів, але й на управління активами, обслуговування тощо. Важливими є такі тенденції:

- сучасна концепція Індустрія 4.0 поступово витісняє класичні, ізольовані від мережі Інтернет системи управління від одного вендора;

- їх замінюють індустріальні *IoT*-системи – розподілені системи, у яких обмінюються інформацією різноманітні пристрої, активно використовуються хмарні та вебтехнології;

- відкритість систем такого типу робить їх вразливими до кібератак;

- вплив атак може спричинити суттєві фізичні та економічні збитки.

Індустріальний Інтернет речей значною мірою ґрунтується на застосуванні вебтехнологій. Це зручно, оскільки дає змогу спостерігати за системою в реальному часі, оперативно впливати на неї, але й зростає потенційна загроза кібератак (рис. 2).



Рис. 2. Ризики безпеки *IIoT*

Приклад атаки на *IIoT*-систему: хакери зламали водоочисні споруди у Флориді, отримали доступ до внутрішньої платформи *ICS* і змінили рівень хімікатів, зробивши воду небезпечною для споживання [37]. Сталося це тому, що для злочинців стала доступна комп'ютерна система співробітника, яка давала змогу віддалено усувати проблеми системи водоочисних споруд.

У такий спосіб хакерам вдалося змінити кількість гідроксиду натрію у воді від 100 до 11100 частин на мільйон.

Отже, будь-які компанії мають зважати на такі запобіжні заходи:

- використання технологій *VPN* – забезпечення безпечного тунелю й облікових даних, що надаються співробітникам для доступу до внутрішніх ресурсів і захисту критичних систем;
- правильна реєстрація та вимкнення: коли співробітники приєднуються до компанії, важливо переконатися, що доступ надається лише за потреби та негайно скасовується, коли працівники залишають її;
- розділення доступу до мережі: гарантуйте, що працівники мають доступ лише до тих систем, які їм потрібні;
- розміщення різних систем у різних мережах, доступ до яких мають лише ті групи співробітників, яким вони потрібні; це гарантує, що в разі злому менше систем може бути скомпрометовано;
- надання робочих пристроїв: коли постає необхідність швидкого переходу на дистанційну роботу (як це було 2020 р.), чимало співробітників отримують віддалений доступ до систем; працівникам надаються спеціальні пристрої замість того, щоб дозволяти доступ до корпоративної мережі з власних гаджетів або ПК; це дасть змогу ІТ-відділам ефективніше контролювати інфраструктуру компанії;
- регулярне навчання співробітників: набуття навичок розпізнавати фішингові листи так само важливо, як і запровадити захисні системи; мірою

того як зловмисники знаходять нові способи проникнення в мережі, підготовка співробітників лише посилить безпеку системи.

1.2. Мета й структура роботи

Метою статті є аналіз сучасних методів, засобів і технологій організації веборієнтованих індустріальних *IoT*-систем та визначення проблем щодо забезпечення кібербезпеки *IIoT*.

У секції 2 наведено класифікацію проаналізованих джерел. У секції 3 подано результати аналізу джерел за визначеними напрямками класифікації. У секції 4 описано здобуті результати. Секція 5 містить висновки та подальші етапи дослідження.

2. Класифікація джерел

Проаналізовані джерела класифіковано за такими напрямками:

- порівняння й аналіз огляду літератури: [19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 30, 33, 34];
- оцінювання безпеки інструментів вебзастосунків: [1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 16, 17, 34, 35, 38, 39, 40];
- методи й рішення забезпечення безпеки Інтернету речей: [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14];
- структура систем індустріального Інтернету речей і технології Індустрія 4.0: [9, 15, 16].

Крім того, джерела було розподілено за типом (рис. 3):

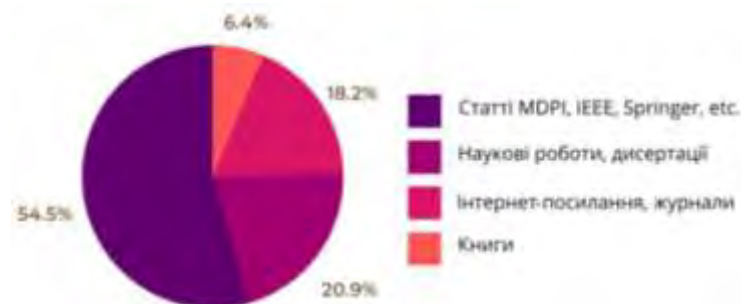


Рис. 3. Класифікація джерел

3. Аналіз джерел за напрямками

3.1. Методи оцінювання та забезпечення кібербезпеки веборієнтованих індустріальних *IoT*-систем на різних етапах життєвого циклу

Основні організації, такі як Міжнародна організація стандартизації (ISO) 27001, сформува-

вимоги щодо впровадження та покращення параметрів безпеки для вебзастосунків [38].

Для компаній і розробників регулярно публікується десятка найкритичніших загроз [39], щоб підвищити поінформованість про безпеку вебзастосунків і зменшити збитки, які завдають потенційні вразливості. Однак, відповідно, існують

рекомендовані шаблони програмування, що допомагають користувачам виправляти небезпечні конфігурації та мінімізувати ризики [40].

Нижче наведено набір ризиків безпеки для вебінтерфейсів.

- *Порушений контроль доступу.* Контроль доступу змушує користувачів діяти чітко в межах ділянки програми, до якої їм надано дозвіл. Якщо застосована політика контролю доступу не є успішною для користувача, отже, він / вона мають доступ до цінних ресурсів.

- *Криптографічні збої* призводять до розкриття конфіденційних даних. З цієї причини шифрування інформації має відповідати найновішим стандартам, уникаючи того, щоб системи (браузер, база даних тощо) використовували застарілі криптографічні функції для шифрування даних, паролів тощо. Також необхідно класифікувати рівень безпеки всіх системних даних, щоб визначити, які криптографічні алгоритми використовувати та як сертифікувати приймач і підтвердити його.

- *Ін'єкція* передбачає низку ризиків, наприклад, *міжсайтовий сценарій (XSS) та ін'єкцію SQL*. Ін'єкція відбувається, коли введена користувачем інформація не перевіряється належним чином і не фільтрується, і вона стає частиною вебсторінки або бази даних. Якщо зловмисний вхід безпосередньо використовується програмою, ворожа інформація може бути впроваджена в записи програми або бази даних, спричиняючи тривалу шкоду системі. Це можна частково виправити, якщо виокремити команди від даних і перевірити вхідну інформацію за допомогою відповідних фільтрів, безпечніших за *API* та елементів керування *SQL*, що обмежують неавторизовані операції та уникають розголошення конфіденційних даних, а також якщо переглядати вихідний код.

- *Неправильна конфігурація безпеки* часто виникає, коли вмикаються, вимикаються, встановлюються чи видаляються функції, залишається обліковий запис і пароль за замовчуванням без змін, використовуються застарілі комплектувальні елементи, а також не вмикаються останні функції безпеки.

- *Помилки ідентифікації та автентифікації* зазвичай є результатом атак грубої сили та/або криптографічних збоїв за допомогою сценаріїв, що постійно намагаються автоматично перевірити комбінації імен користувачів і паролів. Такі дії відомі як атаки грубою силою. Ризики існують, коли

облікова база даних має слабку автентифікацію (наприклад, користувач адміністратора з паролем *abc123*) або коли зловмисники користуються витоком ідентифікаторів сесії, щоб отримати контроль над зв'язком. Більше кроків для перевірки (наприклад, код, безпечні запитання, використання інших пристроїв, таких як мобільний телефон, розпізнавання обличчя тощо) можуть зменшити ризик атак грубою силою. Іншими заходами захисту є використання складних паролів і видалення простих тестових облікових записів.

- Якщо програма залежить від ненадійних бібліотек, модулів та/або інших ресурсів, можуть виникнути збої програмного забезпечення та цілісності даних.

- *Збої в журналі безпеки та моніторингу* мають бути постійним завданням для виявлення активних атак. Створення журналів невдалих спроб входу є основною стратегією запобігання небезпек. Однак цього може бути недостатньо з кількох причин: деякі невдалі спроби входу можуть не реєструватися. Крім того, попередження та помилки можуть не давати чіткого уявлення про ситуацію. Розробник має переконатися, що все керування доступом і збої можуть бути записані з достатньою кількістю даних користувача, зареєстровані відомості зашифровані в разі ін'єкції, і встановлено механізм звіту про помилки.

- *Підроблення запиту* з боку сервера відбувається, коли програма отримує віддалений ресурс без перевірки URL-адреси, наданої користувачем. Унаслідок зловмисник може надіслати створений запит на несподівані посилання, навіть якщо застосунок захищено брандмауером або *VPN*. Застосунок має запобігти цьому, фільтруючи та перевіряючи всі дані, надіслані користувачем, встановлюючи низку схем URL-адрес і уникаючи надсилання необроблених відповідей клієнту.

Згідно зі статистикою 19 % уразливостей сканованих вебзастосунків дають змогу зловмиснику контролювати програму й операційну систему. 2019 р. звіт про вразливості в корпоративних інформаційних системах [1] показав, що майже 75 % векторів проникнення в локальну мережу (*LAN*) мають уразливості в захисті вебзастосунків. Подібним чином лазівки в процесі розроблення створюють серйозні загрози для вебзастосунків.

Крім того, змін у налаштуваннях конфігурації достатньо для усунення лише 17 % вразливостей.

Більшість з них мають низький рівень складності. Зауважимо, що 50% витоків спричиняють розкриття інформації облікового запису та персональних даних, а близько 91% відсканованих вебзастосунків зберігають і обробляють особисту інформацію.

Вибір правильної методології тестування на проникнення для конкретного типу вразливості [43] відіграє важливу роль у скануванні вебзастосунку для виявлення вразливості. Навіть більше, автоматизація тестування вебзастосунків корисна для *pen-tester*, що не тільки знизило обсяг роботи, час, ресурси та вартість, але й зменшило залежність тестувальників від знань людини [44].

Крім того, сканер зберіг людські знання про *pen-testing*, створивши виконувани комп'ютерні програми. Отже, розроблення автоматизованих сканерів безпеки вебзастосунків зробило ручне тестування популярною тенденцією досліджень. У цій сфері розробники перетворюють методи *pen-testing* (*penetration test* / тест на проникнення) у виконувани програми, щоб краще виявляти вразливості вебзастосунків.

3.2. Огляд літератури щодо оцінювання вебзастосунків

Оцінювання зосереджено здебільшого на можливостях обраних вебзастосунків щодо XSS (міжсайтових сценаріїв), на застосуванні SQL, упровадженні коду й несправних елементів керування доступом. Виявлені вразливості було класифіковано, щоб оцінити 17 уразливостей.

У цьому огляді обговорюються різні інструменти. Незважаючи на те, що порівняння та підсумковий аналіз літератури подано в табл. 1, деякі з цих досліджень обмежуються кількома виявленими вразливими місцями, а інші лише порівнюють обмежені сканери.

Однак у цьому опитуванні 11 власних сканерів вебзастосунків із відкритим вихідним кодом порівнювалися з можливостями виявлення десяти найпопулярніших уразливостей *OWASP*.

Інструменти оцінювання вебзастосунків можна знайти як з відкритим кодом, так і запатентовані. Запатентовані інструменти зазвичай пропонують безкоштовні пробні пакети для користувачів і тестерів пера, однак їх можливості та функції обмежені. Існує кілька аспектів, пов'язаних із вибором одного сканера над іншим.

Сканер має виконувати такі функції:

- підтримувати протоколи й алгоритми автентифікації, що використовуються вебзастосунками;

- підтримувати основні типи методів доправлення вхідних даних і мати змогу виявляти вразливості у вебзастосунку з низьким рівнем хибно позитивних результатів;

- перебувати в межах технічних можливостей особи, яка буде ним користуватися;

- бути стабільним і регулярно оновлюватись останніми можливостями безпеки, щоб покрити поточні виявлені вразливості;

- бути обраним, зберігаючи водночас вартість і ліцензування в межах бюджету.

Методи, засоби й технології організації векторієнтованих індустріальних IoT-систем і проблеми забезпечення їх кібербезпеки

Проаналізовано 15 статей за 2019–2022 рр. Виявлено, що для досліджуваних систем пропонуються такі рішення:

- методи забезпечення безпеки *IoT* за допомогою машинного (*Machine Learning*) та глибокого навчання (*Deep Learning*) [10, 11];

- метод оцінювання кібербезпеки вебзастосунків на основі систем керування вмістом [10, 41];

- метод забезпечення кібербезпеки вебсистем шляхом обрання заходів захисту [42];

- методи збирання та аналізу даних пристроїв *IoT* [42];

- методи побудови *VPN*-лацюгів між кінцевими користувачами віртуальної мережі [42].

Огляд методів машинного й глибокого навчання для безпеки Інтернету речей

Рішення:

- *ML* і *DL* дають змогу розробити різні потужні аналітичні методи, що використовуватимуться для підвищення безпеки (рис. 4);

- аналіз трафіку на основі потоку допомагає виявляти зловмисну поведінку без необхідності поглибленого аналізу пакетів;

- інтеграція *ML* і *DL* з блокчейном для безпеки *IoT*.

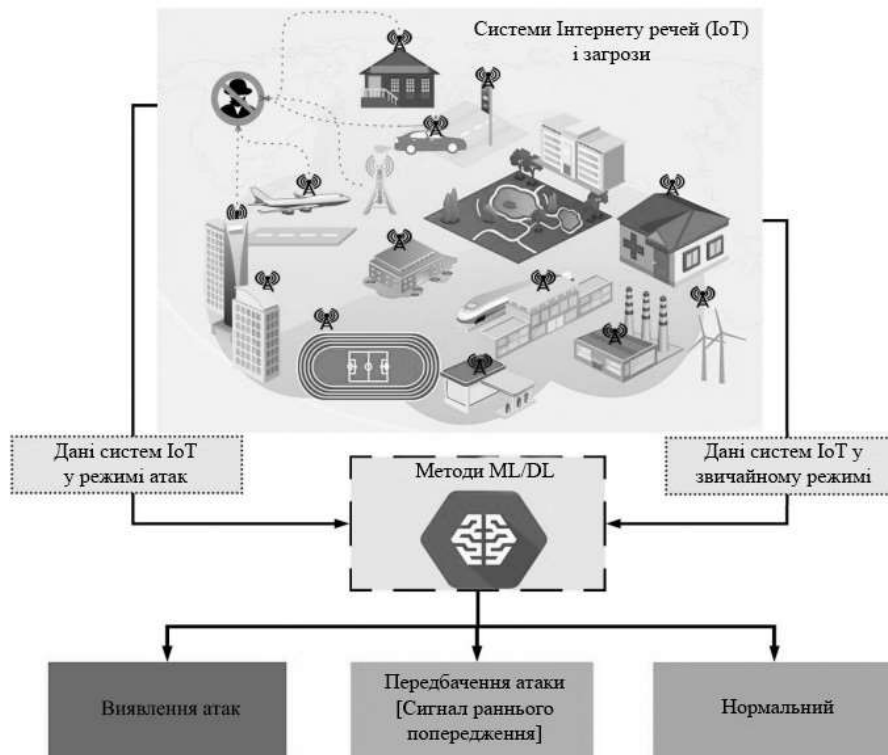
Проблеми та виклики:

- такий підхід потребує чимало часу для поглибленого аналізу, крім того, він погано масштабується;

- цей метод потребує досить багато часу на навчання *ML*.

Таблиця 1. Аналіз літературних джерел і напрямів досліджень

Дослідник	Оцінений сканер	Оцінені вразливості	Основні здобутки	Обмеження
Doupe et al. (2010) [19]	Acunetix 174, AppScan Burp, Grendel-Scan, Hailstorm, Milesan, N-Stalker, NTOSpider, Paros, W3af, Webspect	SQL Injection, Cross-Site Scripting, Code, Injection, Broken Access Controls	точність, час виконання та показники загрози	обсяг виявлення вразливостей дуже обмежений
Bau et al. (2010) [20]	Acunetix, Cenizic, McAfee SECURE, WebInspect, N-Stalker, QualysGuard	Cross-Site Scripting, SQL Injection, Cross-Channel Scripting, Session Management, Cross-Site Request Forgery	Scanner footprint, виявлення вразливості, помилкове спрацювання	сканери можуть виявляти прості атаки ін'єкцій XSS і SQL, але не змогли виявити форму ін'єкцій XSS і SQL другого порядку
Parvez et al. (2015) [21]	Acunetix, Rational AppScan, ZAP	SQL Injection, Stored, XSS	швидкість виявлення для <i>SQLI</i> та <i>XSS</i>	порівнюються лише два комерційні сканери
Suteva et al. (2012) [22]	NetSparker, N-Stalker, OWASP-ZAP, W3af, Iron WASP, Vega	SQL Injection, Command Injection, File Inclusion, XSS	NetSparker має кращий рівень виявлення, ніж інші	Linux, MAC, Windows
El drissi et al. (2017) [23]	BurpSuite, Acunetix, Netsparker, AppSpider, Arachni, Wapiti, SkipFish, W3AF, IronWASP, ZAP and Vega	SQL Injection, Local and Remote File Inclusion, XSS, Path Traversal	уразливості XSS і SQL мають вищий рівень виявлення, <i>Arachni</i> краще працює в інструментах з відкритим кодом	Linux, MAC, Windows
Elahen, Claire et al. (2013) [24]	User Generated Content (UGC) evaluation	Assessing and Ranking UGC Assessment of healthcare systems	хибно позитивний рівень	
Mohit et al. (2017) [25]	BurpSuite, Acunetix, Wapiti, SkipFish, Netsparker, W3AF, AppSpider, Arachni, ZAP, Vega	Cross-Site scripting, SQL injection, Remote code execution, File inclusion	точність, відкликання та <i>F-measure</i>	обмежується ризиками помилкової тривоги й точністю
Gaurav et al. (2018) [26]	Penetration system for malware detection and web assessment using cloud services	OWASP's Vulnerabilities	економічне рішення для вебоцінки	обмежується окремими вебзастосунками
Mehreen et al. (2018) [27]			оцінювання на основі опитувальника з позитивними результатами	для мети оцінювання технічні деталі не надаються
Ashikali et al. (2018) [28]	W3af, Havij, Fimap, Metasploit, Acunetix, Nexpose	OWASP'S Vulnerabilities	основні методи оцінювання вразливості та тестування на проникнення	не проведено жодного порівняльного аналізу
Rawaa (2016) [38]	Paros, Wapiti, Skipfish, Nikto, Wfuzz, NetSparker, HP WebInspect	SQL Injection, Cross-Site Scripting	аналітичне порівняння шести інструментів з відкритим кодом	обговорюється обмежена кількість уразливостей
Mark and Rudolph (2006) [30]	Commercial and Free/Open-source Tools		переваги й недоліки окремих інструментів	окремі засоби не популярні
Fang et al. (2018) [31]	AppScan, AWWVS, Netspark, Vega, W3af		виокремлена функція за допомогою згорткової нейронної мережі точно ідентифікує сканери	модель не можна динамічно покращувати
Alsaleh, Mansour et al. (2017) [32]	Arachni, Wapiti, Skipfish	SQL, Cross-Site Scripting	сканер <i>Arachni</i> може перевірити 100 % тестів <i>SQL</i>	немає істотної різниці в продуктивності між вибраними сканерами
Terry et al. (2018) [33]	OpenVAS, Kismet, Aircrack, SQLMAP, Wapiti	Cross-Site Scripting, Buffer overflow		обмежено лише інформаційною системою охорони здоров'я

Рис. 4. Потенційна роль *ML/DL* у безпеці *IoT*

Поглиблене вивчення та виявлення вразливостей і атак на вебзастосунки: системний огляд

Архітектура вебзастосунків (рис. 5):

- вебпрограми є основним мережним рішенням для надання стандартних вебслужб;
- розроблення цих застосунків ґрунтується на клієнтській і серверній розробці;

- серверний блок містить вебсервер, вебзастосунок і сервер бази даних; він використовує серверні мови сценаріїв, зокрема *.NET*, *PHP* тощо; клієнтський блок працює у веббраузері користувача за допомогою зовнішніх мов сценаріїв, зокрема *CSS/HTML*, *Javascript* і под.

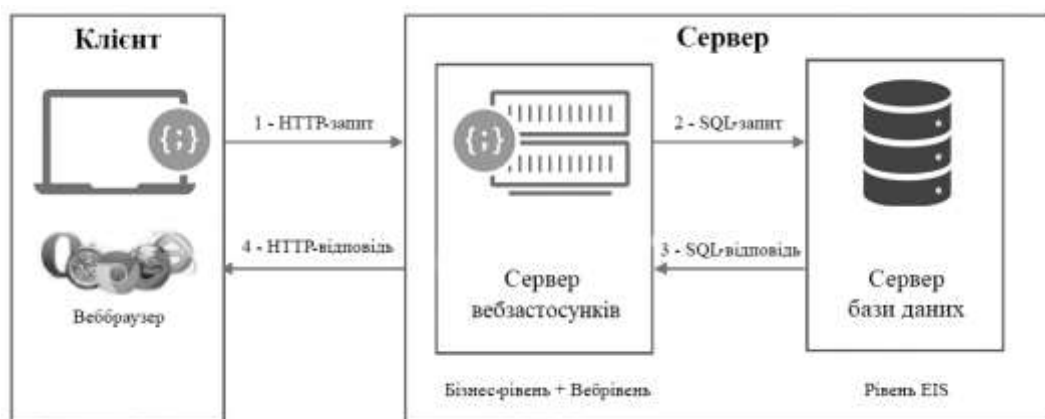


Рис. 5. Огляд вебархітектури

Вразливості вебзастосунків (рис. 6):

- міжсайтова підробка запитів (*CSRF*);
- упродовження *SQL* і міжсайтовий сценарій (*XSS*) як приклади вебатак;
- підробка сертифікатів;
- *DDOS*-атаки;
- слабкі паролі адміністраторів;
- використання ненадійних пристроїв.



LDAP (Lightweight Directory Access Protocol) - Полегшений протокол доступу до директорії / каталогів
OS (Operating Systems) - Операційна система
RFI (Remote File Inclusion) - Віддалене виконання коду
LFI (Local File Inclusion) - Локальне виконання коду, в межах сервера
DT (Directory Traversal attack) - Атака обходу каталогу використовує недостатню перевірку безпеки

Рис. 6. Типи вебуразливостей [41]

Огляд атак, уразливостей і засобів захисту в Індустрії 4.0 з новими викликами у сфері суверенітету даних

- Зі збільшенням кількості пристроїв, підключених до мереж із підтримкою Індустрії 4.0, поверхня атаки також розширюється. Останні впровадження Індустрії 4.0 передбачають такі технології, як хмарні обчислення, штучний інтелект, пристрої *cps* або *iot*.

- У разі зламу ці пристрої можуть завдати серйозної шкоди матеріальним благам, наприклад продуктам на виробничій лінії, або нематеріальним благам, таким як витік конфіденційної інформації чи промислових секретів.

- Подано загальний систематичний огляд поточних атак на кібербезпеку, уразливостей і засобів захисту в сценаріях Індустрії 4.0 і 5.0.

- Наведено детальний аналіз і класифікацію щодо атак, уразливостей і захисту окремих досліджень.

4. Результати аналізу

У проаналізованих публікаціях увагу зосереджено на проблемах кібербезпеки *IoT*-систем загалом та індустриальних *IoT*-систем зокрема:

- безпека мережного рівня архітектури *IoT* залишається привабливою до атак;
- існують ризики безпеки для вебінтерфейсів;

- криптографічні збої також трапляються зі зростанням *IoT*;

- пропонуються локальні рішення, спрямовані на усунення виявлених уразливостей у конкретних компонентах;

- відсутній методологічний підхід забезпечення кібербезпеки вказаних систем на різних етапах життєвого циклу;

- розроблені методи й підходи швидкого виявлення вразливостей безпеки працюють недостатньо ефективно;

- сканери безпеки вебзастосунків мають різні недоліки й часто генерують неправильні результати тестування.

5. Концепція аналізу та забезпечення кібербезпеки

На рис. 7 зображена запропонована концепція аналізу й забезпечення кібербезпеки.

На першому етапі ("Ідентифікація") відбувається виявлення компонентів і протоколів обміну даними між цими компонентами. Цей етап є надзвичайно важливим, адже сучасні індустриальні системи зазвичай передбачають не ексклюзивні розробки, а типові компоненти, що використовуються і в інших системах (вебсервери, підсистеми логування тощо). Уразливості таких компонентів можуть бути привабливою метою для ініціаторів атак.

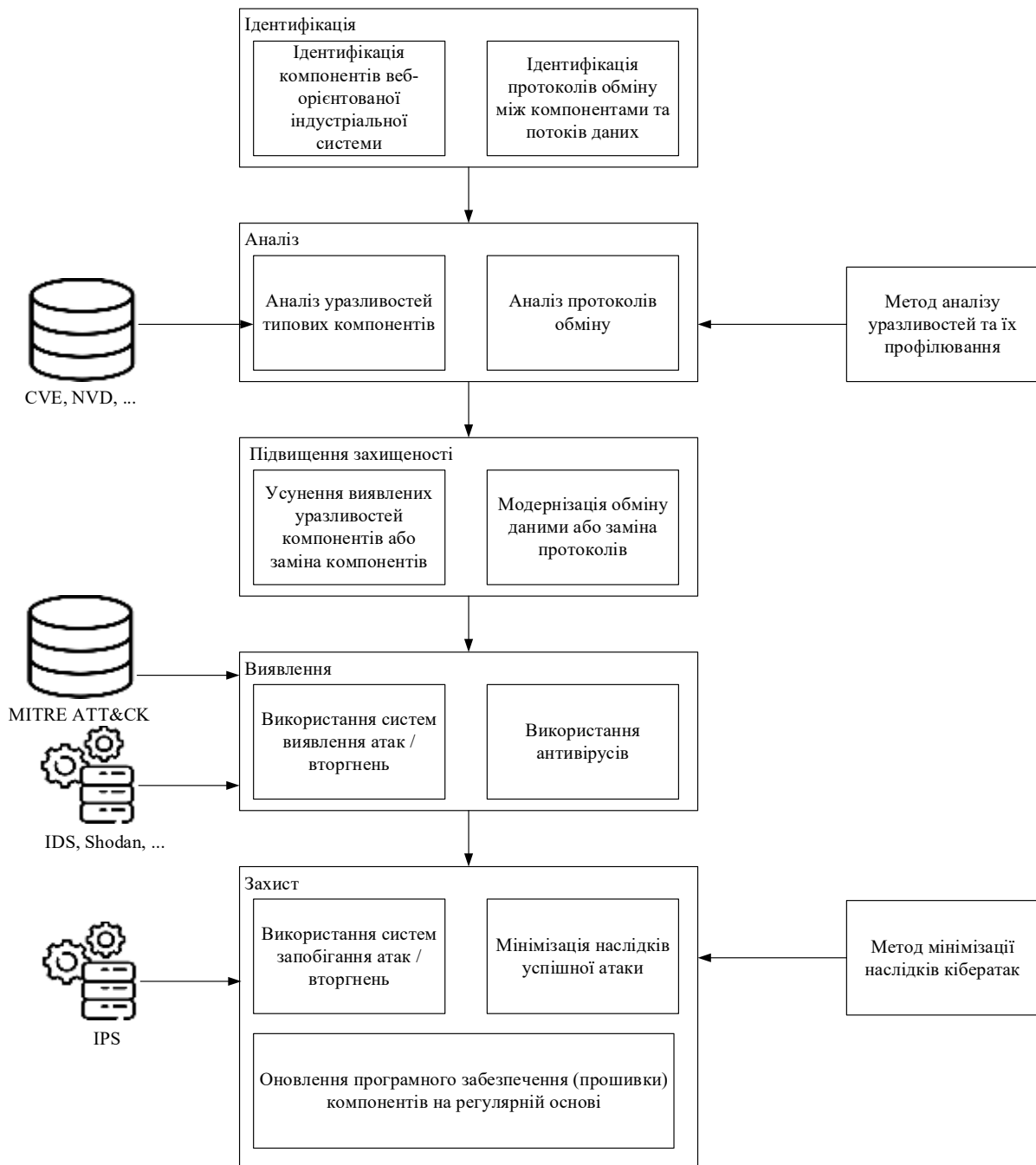


Рис. 7. Концепція аналізу та забезпечення кібербезпеки веборієнтованих промислових IoT-систем

На наступному етапі ("Аналіз") аналізуються вразливості типових компонентів із використанням таких баз, як *CVE (Common Vulnerabilities and Exposures)* [46], *NVD (National Vulnerability Database)* [47] тощо. Крім того, необхідним є аналіз протоколів обміну в частині захищеності даних і критичності їх компрометації.

На третьому етапі ("Підвищення захищеності") здійснюються заходи з усунення вразливостей, виявлених на попередньому етапі, або заміна

компонентів у разі неможливості такого усунення. Крім того, вживаються заходи щодо модернізації обміну даними (наприклад, рознесення моніторингу та керування) або заміна протоколів, якщо вони не відповідають вимогам з кібербезпеки.

Наступний етап ("Виявлення") виконується під час експлуатації систем і передбачає розпізнавання несанкційних вторгнень у функціонування системи. Застосовуються системи виявлення атак / вторгнень (*IDS, Intrusion Detection System*) для розпізнавання

атак у автоматичному режимі та використання наявних баз сценаріїв типових атак (*MITRE ATT&CK* [48] тощо) для виявлення в ручному режимі.

На останньому етапі ("Захист") передбачається використання систем запобігання атакам / вторгненням (*IPS, Intrusion prevention system*), здійснення активностей для підтримки компонентів у захищеному стані (оновлення прошивок тощо), а також формування переліку контрзаходів для мінімізації ризиків у разі успішної кібератаки.

Для підтримки етапу "Аналіз" пропонується розробити метод аналізу вразливостей та їх профілювання (класифікації за впливом на функційну безпеку тощо). Для підтримки етапу "Захист" пропонується розробити метод мінімізації наслідків кібератак (ранжування ризиків, мінімізація ризиків способом упровадження контрзаходів тощо).

6. Висновки

6.1 Обговорення результатів

Оцінка вебзастосунків містить багато дій, спрямованих на підвищення загальної безпеки й надійності проти різних кібератак. Розробники й тестувальники використовують чимало інструментів для сканування застосунків вебсерверів і динамічного виявлення всіх можливих уразливостей. Багато

сканерів вебуразливостей потребують удосконалення для мінімізації рівня хибно позитивного виявлення. Хибно позитивні вразливості здебільшого з'являються з високою частотою за допомогою автоматизованих інструментів, що може призвести до неправильного оцінювання безпеки цільових вебсистем.

Упровадження заходів безпеки, таких як шифрування, автентифікація, контроль доступу, безпека мережі й застосунків для пристроїв Інтернету речей та їх властивих уразливостей, є не достатньо ефективним.

Існує низка методів, підходів виявлення вразливостей у веборієнтованих індустриальних *IoT*-системах, що покращують усю систему загалом, але потребують удосконалення.

Запропонована концепція дасть змогу впровадити необхідні активності до життєвого циклу індустриальних *IoT*-систем, спрямованих на підвищення кібербезпеки.

6.2 Подальші етапи дослідження

Подальшим напрямом роботи є аналіз нормативної бази у сфері Інтернету речей, *IIoT*, їх кібербезпеки з урахуванням вебскладника для формування профілю та перевірки виконання вимог до систем такого типу, а також подальша деталізація запропонованої концепції та методів.

Список літератури

- García-Valls M., Dubey A., Botti V. Introducing the new paradigm of Social Dispersed Computing: Applications, Technologies and Challenges. *Journal of Systems Architecture*. 2018. № 91. P. 83–102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2018.05.007>
- W3C. The World Wide Web Consortium. The World Wide Web Consortium. 2021. URL: www.w3.org (дата звернення 30.05.2022).
- Fielding R., Gettys J., Mogul J., Frystyk H., Masinter L., Leach P., Berners-Lee T. HyperText Transfer Protocol v1.1 HTTP (RFC 2616). The Internet Society: Reston, VA, USA. 1999. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc2616>
- Rescorla E. HTTP over TLS, RFC 1818. Internet Engineering Task Force. 2000. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc2818/>
- Fielding R. T. Representational State Transfer (REST). Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures. *University of California, Irvine*. CA, USA. 2000. Vol. 5. P. 76–147. URL: <https://www.ics.uci.edu/~fielding/pubs/dissertation/top.htm>
- Pedreira V., Barros D., Pinto P. A Review of Attacks, Vulnerabilities, and Defenses in Industry 4.0 with New Challenges on Data Sovereignty Ahead, Sensors. *MDPI Journals, Sensors*. 2021. Vol. 21(15). № 5189. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21155189>
- García-Valls M., Song L. Improving Security of Web Servers in Critical IoT Systems through Self-Monitoring of Vulnerabilities. *MDPI Journals, Sensors*. 2022. Vol. 22. № 5004. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22135004>
- Fang Z., Fu H., Gu T., Qian Z., Jaeger T., Hu P., Mohapatra P. A model checking-based security analysis framework for IoT systems. *Journal of High-Confidence Computing*. 2021. № 100004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hcc.2021.100004>
- Sarwar A., Alnajim A., Marwat S. N. K., Ahmed S., Alyahya S., Khan W. U. Enhanced Anomaly Detection System for IoT Based on Improved Dynamic SBPSO. *MDPI Journals, Sensors*. 2022. Vol. 22. № 4926. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22134926>
- Ervural B. C., Ervural B. Overview of Cyber Security in the Industry 4.0 Era. *Managing The Digital Transformation*. 2017. P. 267–284. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-57870-5_16
- Alaoui R. L., Nfaoui E. H. Deep Learning for Vulnerability and Attack Detection on Web Applications: A Systematic Literature Review. *MDPI Journals, Future Internet*. 2022. Vol. 14. № 118. DOI: <https://doi.org/10.3390/fi14040118>

12. Al-Garadi M. A., Mohamed A., Al-Ali A. K., Guizani M., et al. A Survey of Machine and Deep Learning Methods for Internet of Things (IoT) Security. *IEEE Internet of Things Journal*. 2020. № 19890478. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.2988293>
13. Shahid J., Hameed M. K., Javed I. T., Qureshi K. N., Ali M., Crespi N. A Comparative Study of Web Application Security Parameters: Current Trends and Future Directions. *MDPI Journals, Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. № 4077. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12084077>
14. Pathak G., Gutierrez J., Ghobakhlou A., Rehman S. U. LPWAN Key Exchange: A Centralised Lightweight Approach. *MDPI Journals, Sensors*. 2022. Vol. 22. № 5065. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22135065>
15. Surej H. I., Ma M., Su R. A FeedForward–Convolutional Neural Network to Detect Low-Rate DoS in IoT. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2022. Vol. 114. № 105059. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105059>
16. Ferrer B. R., Mohammed W. M., Chen E., Martinez Lastra J. L. Connecting Web-Based IoT Devices to a CloudBased Manufacturing Platform. *IEEE Internet of Things Journal*. 2017. № 17431808. DOI: <https://doi.org/10.1109/IECON.2017.8217516>
17. Aazam M., Zeadally S., Harras K. A. Deploying Fog Computing in Industrial Internet of Things and Industry 4.0. *IEEE Internet of Things Journal*. 2018. № 18133157. DOI: <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2855198>
18. Kabla H., Anbar M., Manickam S., Al-Amiedy T. A., Cruspe P. B., Al-Ani A. K., Karuppayah S. Applicability of Intrusion Detection System on Ethereum Attacks: A Comprehensive Review. *IEEE Access Journal*. 2022. Vol. 10. № 21863800. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3188637>
19. Gupta A. The IoT Hacker's Handbook. *Apress Berkeley*. CA, 2019. 320 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-4300-8>
20. Doupé A., Cova M., Vigna G. Why Johnny can't pentest: An analysis of black-box web vulnerability scanners. *Proceedings of the International Conference on Detection of Intrusions and Malware, and Vulnerability Assessment*, Bonn, Germany. 2010. Springer: Berlin/Heidelberg. Germany. 2010. P. 111–131. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-14215-4_7
21. Bau J., Bursztein E., Gupta D., Mitchell J. State of the Art: Automated Black-Box Web Application Vulnerability Testing. *IEEE Symposium on Security and Privacy*. Oakland. CA. USA. 2010. P. 332–345. DOI: <https://doi.org/10.1109/SP.2010.27>
22. Parvez M., Zavarisky P., Khoury N. Analysis of effectiveness of black-box web application scanners in detection of stored SQL injection and stored XSS vulnerabilities. *IEEE: Piscataway*. NJ. USA. 2015. P. 186–191. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICITST.2015.7412085>
23. Suteva N., Zlatkovski D., Mileva A. Evaluation and testing of several free/open source web vulnerability scanners. *Conference for Informatics and Information Technology (CIIT 2013)*. Bitola. Macedonia. 2013. P. 221–224. URL: https://www.researchgate.net/publication/261033249_Evaluation_and_Testing_of_Several_Free_Open_Source_Web_Vulnerability_Scanners
24. Idrissi S., Berbiche N., Guerouate F., Shibi M. Performance evaluation of web application security scanners for prevention and protection against vulnerabilities. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017. Vol. 12. № 21. P. 11068–11076. URL: https://www.ripublication.com/ijaer17/ijaerv12n21_76.pdf
25. Momeni E., Cardie C., Diakopoulos N. A survey on assessment and ranking methodologies for user-generated content on the web. *ACM Comput. Surv. (CSUR)*. 2015. Vol. 48(3). P. 1–49. DOI: <https://doi.org/10.1145/2811282>
26. Kumar M., Majithia S., Bhushan S. An Efficient Model for Web Vulnerabilities Detection based on Probabilistic Classification. *Int. J. Technol. Comput. (IJTC). Techlive Solut.* 2016. P. 50–58. URL: www.semanticscholar.org/paper/An-Efficient-Model-for-Web-Vulnerabilities-based-on-Kumar-Majithia/f09ddc0501358e234a5f8e9ebec359beb91db8f1 (дата звернення 12.04.2022).
27. Raj G., Mahajan M., Singh D. Security testing for monitoring web service using Cloud. *IEEE: Piscataway*. NJ, USA. 2018. № 18043392. P. 316–321. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICACCE.2018.8441734>
28. Ahmed M., Adil M., Latif S. Web application prototype: State-of-art survey evaluation. *IEEE: Piscataway*. NJ, USA. 2015. № 15756740. P. 19–24. DOI: <https://doi.org/10.1109/NSEC.2015.7396339>
29. Hasan A., Meva D. Web Application Safety by Penetration Testing. *Int. J. Adv. Stud. Sci. Res.* 2018. URL: www.academia.edu/38248493/Web_Application_Safety_by_Penetration_Testing (дата звернення 12.04.2022).
30. Mohammed R. Assessment of Web Scanner Tools. *Int. J. Comput. Appl.* 2016. Vol. 133(5). P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.5120/ijca2016907794>
31. Curphey M., Arawo R. Web application security assessment tools. *IEEE Secur. Priv.* 2006. Vol. 4. P. 32–41. DOI: <https://doi.org/10.1109/MSP.2006.108>
32. Fang Y., Long X., Liu L., Huang C. DarkHunter: A fingerprint recognition model for web automated scanners based on CNN. *2nd International Conference on Cryptography, Security and Privacy*. Guiyang, China. 2018. ACM: New York, NY, USA. 2018. P. 10–15. DOI: <https://doi.org/10.1145/3199478.3199504>
33. Alsaleh M., Alomar N., Alshreef M., Alarifi A., Al-Salman A. Performance-based comparative assessment of open source web vulnerability scanners. *Secur. Commun. Netw.* 2017. URL: www.hindawi.com/journals/scn/2017/6158107 (дата звернення 12.04. 2022).
34. Terry M., Oigiagbe O. D., Acharya S. A comprehensive security assessment toolkit for healthcare systems. *Colonial Academic Alliance Undergraduate Research Journal*. 2015. Vol. 4. P. 1–6. URL: <https://scholarworks.wm.edu/caaurj/vol4/iss1/6>
35. Furrer F. J. Safety and Security of Cyber-Physical Systems. Engineering dependable Software using Principle-based Development. 2022. 521 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-37182-1>
36. Wu D., Ren A., Zhang W., Fan F., Liu P., Fu X., Terpenney J. Cybersecurity for digital manufacturing. *J. Manuf. Syst.* 2018. Vol. 48. P. 3–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.03.006>
37. Bublil S., Kessler A. How Industrial IoT could Trigger the Next Cyber Catastrophe. 2020. URL: www.kovrr.com/reports/how-industrial-iot-could-trigger-the-next-cyber-catastrophe-2 (дата звернення 22.03.2020).
38. Henriquez M. Hacker breaks into Florida water treatment facility, changes chemical levels. *Security Magazine*. 2021. URL: <https://www.securitymagazine.com/articles/94552-hacker-breaks-into-florida-water-treatment-facility-changes-chemical-levels> (дата звернення 9.02.2021).

39. ISO/IEC 27001. Information Technology. Security Techniques. Information Security Management Systems-Requirements. ISO/IEC International Standards Organization: Geneva, Switzerland. 2005. URL: https://www.google.com/aclk?sa=l&ai=DChcSEWjp6qK3paCAAxWgn2gJHddUA2QYABABGgJ3Zg&sig=AOD64_1a4QkPT5Or3O6oAT-YqyvW4zlqgQ&q&adurl&ved=2ahUKewifwpG3paCAAxWTiFwKHThIBeIQ0Qx6BAgPEAE
40. Top 10 Web Application Security Risks. The OWASP Foundation. 2022. URL: <https://www.owasp.org> (дата звернення 30.05.2022).
41. Agreindra Helmiawan M., Firmansyah E., Fadel I., Sofivan Y., Mahardika F., Guntara A. Analysis of Web Security Using Open Web Application Security Project 10. *8th International Conference on Cyber and IT Service Management (CITSM)*. Pangkal, Indonesia. 2020. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/CITSM50537.2020.9268856>
42. OWASP Application Security Verification Standard. OWASP. 2022. URL: <http://www.owasp.org/index.php/ASVS> (дата звернення 20.02.2022).
43. Morozova O. I., Nicheporuk A. O., Tets'kyi A. H., Tkachov V. M. Methods and technologies for ensuring cybersecurity of industrial and web-based systems and networks. *National Aerospace University – "Kharkiv Aviation Institute": Scientific work*. № 4. 2021. P. 145–156 DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2021.4.12>
44. Bhorkar G. Security Analysis of an Operations Support System. School of Science. Master's Programme in Computer, Communication and Information Sciences. *Aalto University*. 2017. URL: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/29252> (дата звернення 12.04.2022).
45. Seng L. K., Ithnin N., Said S. Z. M. The approaches to quantify web application security scanners quality: a review. *Int. J. Adv. Comput. Res.* 2018. Vol. 8. P. 285–312. DOI: <https://doi.org/10.19101/IJACR.2018.838012>
46. Common Vulnerabilities and Exposures. URL: <https://cve.mitre.org/>
47. National Vulnerability Database. URL: <https://nvd.nist.gov/>
48. MITRE ATT&CK for ICS. URL: <https://attack.mitre.org/techniques/ics/>

References

1. García-Valls, M., Dubey, A., Botti, V. (2018), "Introducing the new paradigm of Social Dispersed Computing: Applications, Technologies and Challenges", *Journal of Systems Architecture*, No. 91. P. 83–102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2018.05.007>.
2. "W3C. The World Wide Web Consortium, The World Wide Web Consortium 2021", available at: www.w3.org. (last accessed 30.05.2022).
3. Fielding, R., Gettys, J., Mogul, J., Frystyk, H., Masinter, L., Leach, P., Berners-Lee, T. (1999), "HyperText Transfer Protocol v1.1; HTTP (RFC 2616)", The Internet Society: Reston, VA, USA, available at: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc2616>
4. Rescorla, E. (2000), "HTTP over TLS, RFC 1818", Internet Engineering Task Force, available at: <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc2818/>
5. Fielding, R.T. (2000), "Representational State Transfer (REST). Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures", *University of California, Irvine, CA, USA*, Vol. 5, P. 76–147, available at: <https://www.ics.uci.edu/~fielding/pubs/dissertation/top.htm>
6. Pedreira, V., Barros, D., Pinto, P. (2021), "A Review of Attacks, Vulnerabilities, and Defenses in Industry 4.0 with New Challenges on Data Sovereignty Ahead, Sensors", *MDPI Journals, Sensors*, Vol. 21(15), No. 5189. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21155189>
7. García-Valls, M., Song, L. (2022), "Improving Security of Web Servers in Critical IoT Systems through Self-Monitoring of Vulnerabilities", *MDPI Journals, Sensors*, Vol. 22, No. 5004. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22135004>
8. Fang, Z., Fu, H., Gu, T., Qian, Z., Jaeger, T., Hu, P., Mohapatra, P. (2021), "A model checking-based security analysis framework for IoT systems", *Journal of High-Confidence Computing*, No. 100004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hcc.2021.100004>
9. Sarwar, A., Alnajim, A., Marwat, S. N. K., Ahmed, S., Alyahya, S., Khan, W.U. (2022), "Enhanced Anomaly Detection System for IoT Based on Improved Dynamic SBPSO", *MDPI journals, Sensors*, Vol. 22, No. 4926. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22134926>
10. Ervural, B. C., Ervural, B. (2017), "Overview of Cyber Security in the Industry 4.0 Era", *Managing the Digital Transformation*, P. 267–284. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-57870-5_16
11. Alaoui, R. L., Nfaoui, E. H. (2022), "Deep Learning for Vulnerability and Attack Detection on Web Applications: A Systematic Literature Review", *MDPI Jjournals, Future Internet*, Vol. 14, No. 118. DOI: <https://doi.org/10.3390/fi14040118>
12. Al-Garadi, M. A., Mohamed, A., Al-Ali, A., Guizani, M. et al. (2020), "A Survey of Machine and Deep Learning Methods for Internet of Things (IoT) Security", *IEEE Internet of Things Journal*, No. 19890478. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.2988293>
13. Shahid, J., Hameed, M. K., Javed, I. T., Qureshi, K. N., Ali, M., Crespi, N. (2022), "Comparative Study of Web Application Security Parameters: Current Trends and Future Directions", *MDPI Journals, Applied Sciences*, Vol. 12, No. 4077. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12084077>
14. Pathak, G., Gutierrez, J., Ghobakhlou, A., Rehman, S. U. (2022), "LPWAN Key Exchange: A Centralised Lightweight Approach", *MDPI Journals, Sensors*, Vol. 22, No. 5065. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22135065>
15. Surej, H. I., Ma, M., Su, R. (2022), "A Feed Forward–Convolutional Neural Network to Detect Low-Rate DoS in IoT", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 114, No. 105059. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105059>
16. Ferrer, B. R., Mohammed, W. M., Chen, E., Martinez Lastra, J. L. (2017), "Connecting Web-Based IoT Devices to a CloudBased Manufacturing Platform", *IEEE Internet of Things Journal*, No. 17431808. DOI: <https://doi.org/10.1109/IECON.2017.8217516>

17. Aazam, M., Zeadally, S., Harras, K. A. (2018), "Deploying Fog Computing in Industrial Internet of Things and Industry 4.0", *IEEE Internet of Things Journal*, No. 18133157. DOI: <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2855198>
18. Kabla, H., Anbar, M., Manickam, S., Al-Amiedy, T. A., Cruspe, P. B., Al-Ani, A. K., Karuppayah, S. (2022), "Applicability of Intrusion Detection System on Ethereum Attacks: A Comprehensive Review", *IEEE Access Journal*, Vol. 10, No. 21863800. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3188637>
19. Gupta, A. (2019), *The IoT Hacker's Handbook*, Apress Berkeley, CA, 320 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-4300-8>
20. Doupé, A., Cova, M., Vigna, G. (2010), "Why Johnny can't pentest: An analysis of black-box web vulnerability scanners", *In Proceedings of the International Conference on Detection of Intrusions and Malware, and Vulnerability Assessment*, Bonn, Germany, Springer: Berlin/Heidelberg, Germany. P. 111–131. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-14215-4_7
21. Bau, J., Bursztein, E., Gupta, D., Mitchell, J. (2010), "State of the Art: Automated Black-Box Web Application Vulnerability Testing", *IEEE Symposium on Security and Privacy*, Oakland, CA, USA, P. 332–345. DOI: <https://doi.org/10.1109/SP.2010.27>
22. Parvez, M., Zavorsky, P., Khoury, N. (2015), "Analysis of effectiveness of black-box web application scanners in detection of stored SQL injection and stored XSS vulnerabilities", *IEEE: Piscataway*, NJ, USA, P. 186–191. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICITST.2015.7412085>
23. Suteva, N., Zlatkovski, D., Mileva, A. (2013), "Evaluation and testing of several free/open source web vulnerability scanners", *Conference for Informatics and Information Technology (CIIT 2013)*, Bitola, Macedonia, P. 221-224, available at: https://www.researchgate.net/publication/261033249_Evaluation_and_Testing_of_Several_FreeOpen_Source_Web_Vulnerability_Scanners
24. Idrissi, S., Berbiche, N., Guerouate, F., Shibi, M. (2017), "Performance evaluation of web application security scanners for prevention and protection against vulnerabilities", *International Journal of Applied Engineering Research*, Vol. 12, No. 21, P. 11068–11076, available at: https://www.ripublication.com/ijaer17/ijaerv12n21_76.pdf
25. Momeni, E., Cardie, C., Diakopoulos, N. (2015), "A survey on assessment and ranking methodologies for user-generated content on the web", *ACM Comput. Surv (CSUR)*, Vol. 48(3), P. 1–49. DOI: <https://doi.org/10.1145/2811282>
26. Kumar, M., Majithia, S., Bhushan, S. (2016), "An Efficient Model for Web Vulnerabilities Detection based on Probabilistic Classification", *Int. J. Technol. Comput. (IJTC), Techlive Solut*, P. 50–58, available at: www.semanticscholar.org/paper/An-Efficient-Model-for-Web-Vulnerabilities-based-on-Kumar-Majithia/f09ddc0501358e234a5f8e9ebec359beb91db8f1. (last accessed 12.04.2022).
27. Raj, G., Mahajan, M., Singh, D. (2018), "Security testing for monitoring web service using Cloud", *IEEE: Piscataway*, NJ, USA, No. 18043392. P. 316–321. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICACCE.2018.8441734>
28. Ahmed, M., Adil, M., Latif, S. (2015), "Web application prototype: State-of-art survey evaluation", *IEEE: Piscataway*, NJ, USA, No. 15756740, P. 19–24. DOI: <https://doi.org/10.1109/NSEC.2015.7396339>
29. Hasan, A., Meva, D. (2018), "Web Application Safety by Penetration Testing", *Int. J. Adv. Stud. Sci. Res.*, available at: www.academia.edu/38248493/Web_Application_Safety_by_Penetration_Testing (last accessed 12.04.2022)
30. Mohammed, R. (2016), "Assessment of Web Scanner Tools", *Int. J. Comput. Appl.*, Vol. 133(5), P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.5120/ijca2016907794>
31. Curphey, M., Arawo, R. (2006), "Web application security assessment tools", *IEEE Secur. Priv.*, Vol. 4, P. 32–41. DOI: <https://doi.org/10.1109/MSP.2006.108>
32. Fang, Y., Long, X., Liu, L., Huang, C. (2018), "DarkHunter: A fingerprint recognition model for web automated scanners based on CNN", *2nd International Conference on Cryptography, Security and Privacy*, Guiyang, China, ACM: New York, USA, P. 10–15. DOI: <https://doi.org/10.1145/3199478.3199504>
33. Alsaleh, M., Alomar, N., Alshreef, M., Alarifi, A., Al-Salman, A. (2017), "Performance-based comparative assessment of open source web vulnerability scanners", *Secur. Commun. Netw.*, available at: www.hindawi.com/journals/scn/2017/6158107 (last accessed 12.04.2022).
34. Terry, M., Oigiagebe, O. D., Acharya, S. (2015), "A comprehensive security assessment toolkit for healthcare systems", *Colonial Academic Alliance Undergraduate Research Journal*, Vol. 4, P. 1–6, available at: <https://scholarworks.wm.edu/caaurj/vol4/iss1/6>
35. Furrer, F. J. (2022), *Safety and Security of Cyber-Physical Systems*, Engineering dependable Software using Principle-based Development, 521 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-37182-1>
36. Wu, D., Ren, A., Zhang, W., Fan, F., Liu, P., Fu, X., Terpenney, J. (2018), "Cybersecurity for digital manufacturing", *J. Manuf. Syst.*, Vol. 48, P. 3–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.03.006>
37. Bublil, S., Kessler, A. (2020), "How Industrial IoT could Trigger the Next Cyber Catastrophe", available at: www.kovrr.com/reports/how-industrial-iot-could-trigger-the-next-cyber-catastrophe-2 (last accessed 22.03.2020)
38. Henriquez, M. (2021), "Hacker breaks into Florida water treatment facility, changes chemical levels", *Security Magazine*, available at: <https://www.securitymagazine.com/articles/94552-hacker-breaks-into-florida-water-treatment-facility-changes-chemical-levels> (last accessed 9.02.2021)
39. ISO/IEC 27001 (2005), "Information Technology. Security Techniques", Information Security Management Systems—Requirements. ISO/IEC International Standards Organization: Geneva, Switzerland, available at: https://www.google.com/aclk?sa=l&ai=DChcSEWjp6qK3paCAAxWgn2gJHddUA2QYABABGgJ3Zg&sig=AOD64_1a4QKpT5Or3O6oAT-YqyvW4z1qgQ&q&adurl&ved=2ahUKewifwpG3paCAAxWTiFwKHTHIBelQ0Qx6BAgPEAE
40. "Top 10 Web Application Security Risks" (2022), The OWASP Foundation, available at: <https://www.owasp.org> (last accessed 30.05.2022).
41. Helmiawan, M. A., Firmansyah, E., Fadil, I., Sofivan, Y., Mahardika, F., Guntara, A. (2020), "Analysis of Web Security Using Open Web Application Security Project 10", *International Conference on Cyber and IT Service Management (CITSM)*, Pangkal, Indonesia, P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/CITSM50537.2020.9268856>

42. OWASP Application Security Verification Standard, (2022), *OWASP*, available at: <http://www.owasp.org/index.php/ASVS> (last accessed 20.02.2022).
43. Morozova, O. I., Nicheporuk, A. O., Tets'kyi, A. H., Tkachov, V. M. (2021), "Methods and technologies for ensuring cybersecurity of industrial and web-based systems and networks", *National Aerospace University – "Kharkiv Aviation Institute": Scientific work*, No. 4. P. 145–156. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2021.4.12>
44. Bhorakar, G. (2017), "Security Analysis of an Operations Support System", School of Science, Master's Programme in Computer, Communication and Information Sciences, *Aalto University*, available at: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/29252> (last accessed 12.04.2022).
45. Seng, L. K., Ithnin, N., Said, S. Z. M. (2018), "The approaches to quantify web application security scanners quality: a review", *Int. J. Adv. Comput. Res.*, Vol. 8, P. 285–312. DOI: <https://doi.org/10.19101/IJACR.2018.838012>
46. "Common Vulnerabilities and Exposures", available at: <https://cve.mitre.org/>
47. "National Vulnerability Database", available at: <https://nvd.nist.gov/>
48. "MITRE ATT&CK for ICS", available at: <https://attack.mitre.org/techniques/ics/>

Received 16.06.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Мерзлікін Євген Васильович – Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", аспірант кафедри комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Харків, Україна; e-mail: y.v.merzlikin@csn.khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8613-1121>

Бабешко Євген Васильович – кандидат технічних наук, доцент, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", доцент кафедри комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Харків, Україна; e-mail: e.babeshko@csn.khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4667-2393>

Merzlikin Eugene – National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", PhD Student, Computer Systems, Networks and Cybersecurity Department, Kharkiv, Ukraine.

Babeshko Ievgen – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Associate Professor at the Computer Systems, Networks and Cybersecurity Department, Kharkiv, Ukraine.

CYBERSECURITY ANALYSIS OF WEB-ORIENTED INDUSTRIAL IOT-SYSTEMS

In modern world cybersecurity ensuring is one of the most crucial issues, especially in the context of the dynamic development of web-oriented industrial Internet of Things (IoT) systems. The subject of research of the paper is cybersecurity ensuring of web-oriented industrial IoT systems. **The purpose** of the paper is to analyze existing methods of cybersecurity analysis, identify limitations, and formulate requirements for a new assessment concept, which includes ways to eliminate identified limitations. **Tasks to be solved:** analysis of existing methods, tools and technologies for the organization of web-oriented industrial IoT systems and the problems of ensuring their cyber security. Applied **methods:** source analysis, system analysis. Obtained **results:** The analysis of sources has shown that the problems of industrial IoT systems cybersecurity ensuring are relevant due to the use in one system of both the latest information technologies (IT) and traditional operational technologies (OT), such as industrial protocols, etc. In addition, the ever-increasing number and types of attacks aimed specifically at industrial IoT systems are additional drivers for the further development of the cybersecurity assessing and ensuring methods. A generalized concept of the cybersecurity assessing and ensuring process of web-oriented industrial IoT systems is proposed, which includes the stages of identification, analysis, security enhancement, detection and protection. **Conclusions:** The issue of the cybersecurity ensuring of the web-oriented industrial IoT systems is extremely relevant, and the existing analysis methods and ensuring means do not fully satisfy the existing requirements for such systems. That is why the development and implementation of the proposed concept of cybersecurity assessing and ensuring will allow to significantly influence the improvement of industrial IoT systems cybersecurity.

Keywords: cyber security; IoT; Industry 4.0; web-oriented systems; web-application security; detection of vulnerabilities; detection of web attacks.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Мерзлікін Є. В., Бабешко Є. В. Аналіз кібербезпеки веборієнтованих індустріальних IoT-систем. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 2 (24). С. 131–144. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.131>

Merzlikin, E., Babeshko, I. (2023), "Cybersecurity analysis of web-oriented industrial IOT-systems", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (24), P. 131–144. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.131>

І. НЕВЛЮДОВ, С. НОВОСЕЛОВ, К. СУХАЧОВ

МЕТОД ОДНОЧАСНОЇ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ТА КАРТОГРАФУВАННЯ ДЛЯ ПОБУДОВИ 2,5D-КАРТИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ЗАСОБАМИ ROS

Метод *SLAM* (одночасної локалізації та картографування) на сьогодні є актуальною темою для досліджень і розвитку в галузі робототехніки та комп'ютерного зору. *SLAM* широко застосовується в різних сферах, зокрема автономної навігації інтелектуальних роботів. З допомогою цього методу розв'язуються проблеми в розширеній і віртуальній реальності, БПЛА та інших систем. За останні роки *SLAM* здобув значні досягнення завдяки поступовому розвитку його алгоритмів, використанню новітніх датчиків, а також покращенню обчислювальної потужності комп'ютерів. **Предметом дослідження** є сучасні методи одночасної локалізації та картографування в режимі реального часу. **Мета роботи** – моделювання розробленого алгоритму для побудови карт навколишнього середовища та визначення місця розташування й орієнтації інтелектуального робота в просторі в режимі реального часу за допомогою пакетів ROS. **Завдання статті** – демонстрація результатів поєднання методів *SLAM* та розроблення нових підходів до розв'язання проблем одночасної локалізації та картографування. Для досягнення поставлених завдань використано комбінацію методів лазерного сканування (*2D LRF*) та глибинного відтворення зображень (*RGB-D*) для одночасної локалізації та картографування інтелектуального робота та побудови 2,5D-карти середовища. Здобуті результати є обнадійливими та демонструють перспективність роботи об'єднаних методів *SLAM*, що застосовуються разом для забезпечення й очного виконання одночасної локалізації та картографування інтелектуальних роботів у режимі реального часу. Запропонований метод дає змогу враховувати висоти перешкод у побудові карти навколишнього середовища, витрачаючи менші обчислювальні потужності. У висновку такий підхід розширює технології, не замінюючи наявні робочі пропозиції, й уможливує використання сучасних методів для всебічного виявлення та розпізнавання довкілля за допомогою ефективного локалізаційного та картографічного підходу, надаючи більш точні результати з використанням менших ресурсів.

Ключові слова: *SLAM*; ROS; *2D LRF*; *RGB-D*; 2,5D-карта висоти; методи одночасної локалізації та картографування; інтелектуальний робот; визначення місця розташування; моделювання та симуляція.

Вступ

Роботи є передовою технологією, що має значний вплив на різні сфери суспільства. Вони є універсальними пристроями для відтворення рухових та інтелектуальних функцій і можуть виконувати види діяльності, які для людини трудомісткі, тяжкі, монотонні, шкідливі для її здоров'я та життя.

Незважаючи на те, що більшістю роботів досі керують фахівці й ці технології працюють за чіткою програмою, з'являється все більше інтелектуальних пристроїв, що можуть виконувати різноманітні складні операції без утручання людини [1].

Особливо актуальним є розроблення інтелектуальних роботів із розвиненими можливостями одночасно локалізувати та картографувати навколишнє середовище в режимі реального часу. Це дає змогу здійснювати автономне функціонування інтелектуальних мобільних роботів, зокрема пересування в незнайомій місцевості, у незвичних умовах і за наявності певної міри невизначеності даних, що надходять від довкілля.

З огляду на сказане для забезпечення автономного функціонування роботів, зокрема їх пересування в незнайомих місцевостях та в складних умовах, надзвичайно важливе значення набувають системи розміщення, зокрема їх методи локалізації та картографування.

Нині більшість автономних роботів використовують своє відображення навколишнього середовища у 2D- або 3D-картах для того, щоб точно визначити своє місце розташування та безпечно переміщуватися у фізичному просторі. Однак однією з основних проблем картографування інтелектуальних роботів полягає в тому, що 2D-карта не містить достатньої інформації про перешкоди на різних рівнях висот, а для створення 3D-карт потрібні значні обчислювальні потужності, багато часу на оброблення даних і значний обсяг пам'яті.

У цій роботі пропонується метод локалізації інтелектуального робота за допомогою співпраці методів лазерного сканування (*2D LRF*) та глибинного відтворення зображень (*RGB-D*) для побудови 2,5D-карти [2].

Такий підхід є особливо корисним у ситуаціях, коли інтелектуальний мобільний робот має сприймати інформацію про перешкоди на різних рівнях висот. Багато сучасних автономних систем стикаються з такими сценаріями, що обмежують їх можливості для розгортання та збільшують витрати, оскільки середовище має бути ретельно підготовлено, щоб вони могли функціонувати.

Ефективність запропонованого методу була перевірена за допомогою симуляції в програмному середовищі *ROS (Robot Operating System)*. Унаслідок цього згенеровано *2,5D*-карту висот, що була використана для автономної навігації та генерування маршруту руху інтелектуального робота.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Інтелектуальний мобільний робот може визначати своє місце розташування за допомогою апріорно наявної карти простору або шляхом аналізу своїх спостережень [3]. В ідеальному випадку карту навколишнього середовища було б добре завантажити в робота завчасно, але на практиці це не завжди можливо.

Тому постає завдання навчити робота одночасно будувати карту довкілля та визначати своє місце розташування в цьому просторі, розробляючи можливий шлях траєкторії переміщення.

Напрямок, що описує методи розв'язання цього завдання, називається *SLAM (Simultaneous Localization And Mapping)*. *SLAM* – це завдання у сфері робототехніки, що потребує від робота одночасно визначати своє місце в середовищі й будувати мапу цього середовища [4].

Методи одночасної локалізації та картографування (*SLAM*) – це концепція, яка сполучає два взаємно залежних процеси навігації та побудови карт в єдиний цикл обчислень. Це дає змогу інтелектуальним роботам отримувати дані про навколишнє середовище, створювати карту, визначати своє місце розташування та орієнтацію в просторі.

Сутність методу полягає в тому, що робот використовує різні датчики (наприклад, камеру, лазерний далекомір, гіроскоп та акселерометр) для збирання інформації про довкілля та своє розміщення. Потім він обробляє ці дані, щоб зрозуміти, як він перебуває в просторі та як навколишнє середовище виглядає.

Варто зазначити, що *SLAM* – це не якийсь конкретний алгоритм, а набір методів і різноманітних засобів, що допомагають виконувати завдання щодо визначення місця розташування робота та побудови карти місцевості. На сьогодні існує значна кількість методів, що використовують як апаратні, так і програмні можливості. Вибір методу залежить від конкретного завдання та характеристик застосовуваних датчиків. Однак загальною метою цих методів є забезпечення високої точності та швидкості оброблення інформації з датчиків, щоб дати змогу роботу зорієнтуватися в навколишньому просторі та рухатися в ньому безпечно та ефективно.

Основна ідея більшості методів *SLAM* та їх алгоритмів проста. Перебуваючи в певному положенні, робот починає виявляти об'єкти навколо. Зробивши перші заміри відстаней, він їх запам'ятовує та рухається в напрямку інших об'єктів. Після того, як усі об'єкти в деякому просторі знайдені та відстані до них виміряні, робот повертається на вихідну позицію. Швидше за все, він потрапить в інше місце, а не в те, у якому перебував спочатку. Відбувається це через помилки одометрії. Далі робот починає друге коло вимірювань, у якому помилка скорочується.

Нині найбільш популярними є методи, основані на розширеному фільтрі Калмана (*EKF*) [5] та на фільтрі частинок (метод Монте-Карло) [6]. Поступово другий підхід витісняє перший. Основним недоліком розширеного фільтра Калмана є його квадратична обчислювальна складність від кількості об'єктів на карті. Фільтр частинок має логарифмічну складність (залежить від кількості осередків на карті та кількості частинок).

Під час розв'язання завдання *SLAM* постають дві основні проблеми. Перша – це проблема збіжності. Вона безпосередньо пов'язана з точністю обчислень. Будь-які датчики та системи одометрії мають певну модель помилки. Проте точно визначити цю модель найчастіше неможливо, тому користуються різноманітними спрощеннями, що спричиняють неточності в побудові карти.

Друга проблема – обчислювальна складність алгоритмів. Частково цю проблему вирішено, й на сьогодні існують алгоритми, що асимптотично розв'язують це завдання за логарифмічний час. Однак структурна складність довкілля така, що навіть за таких обчислень не завжди вдається вирішувати завдання в прийнятний час.

Додатковою проблемою є те, що завдання *SLAM* найчастіше постає перед інтелектуальними роботами, для яких питання споживання електроенергії є найважливішим, отже, з метою енергозбереження розробники інтелектуальних роботів змушені обмежувати обчислювальні потужності використовуваних апаратних платформ.

Зрештою, незважаючи на те, що очі робота (його сенсори) бачать об'єкти в темряві, він не завжди може впоратися з обсягом і якістю інформації, яка надходить.

Математична модель проблеми *SLAM*

SLAM – це проблема оцінювання. Ми хочемо оцінити як змінну X , що містить траєкторію або позу робота, так і змінну M , що подає положення орієнтирів у середовищі. З огляду на набір вимірювань $Z = \{z_1, \dots, z_m\}$ і модель вимірювання або спостереження $h(\cdot)$, що виражає z_k як функцію X і M [5], маємо

$$z_k = h(X_k, M_k) + \epsilon_k, \quad (1)$$

де X_k , M_k – підмножини X та M , а ϵ_k – шум випадкового вимірювання.

SLAM має тенденцію розв'язувати проблему максимальної апостеріорної ймовірності (*MAP*) таким чином, що:

$$\begin{aligned} \{X^*, M^*\} &= \operatorname{argmax}_{\{X, M\}} p(X, M | Z) = \\ &= \operatorname{argmax}_{\{X, M\}} p(Z | X, M) p(X, M), \end{aligned} \quad (2)$$

де $(Z | X, M)$ – це ймовірність вимірювання Z за X і M , а $p(X, M)$ – це апіорне знання X та M .

Якщо припустити, що спостереження z_k є незалежними, проблема *MAP* виглядає так:

$$\begin{aligned} \{X^*, M^*\} &= \operatorname{argmax}_{\{X, M\}} \prod_{k=1}^m p(z_k | X, M) p(X, M) = \\ &= \operatorname{argmax}_{\{X, M\}} \prod_{k=1}^m p(z_k | X_k, M_k) p(X, M). \end{aligned} \quad (3)$$

Імовірнісне рішення *SLAM*-фреймворку

Як було зазначено вище, *SLAM* є рекурсивним процесом оцінювання. Такий процес часто розглядається в імовірнісному вигляді, коли потрібно виконувати класичний крок передбачення та оновлення.

Розглядаючи робота, який рухається в невідомому середовищі, визначаємо [5]:

x_k – вектор стану, що описує робота в момент часу k ;

$x_{k|k-1}$ – оцінений вектор стану в момент часу k , беручи до уваги знання про попередній стан;

u_k – вектор керування, застосований на $k-1$ для переміщення транспортного засобу в стан x_k (якщо він був передбачений);

m_i – вектор, що описує i -й орієнтир;

$z_{k,i}$ – спостереження i -ї ознаки, зробленої в час k ;

X – набір місць розташування транспортних засобів від часу 0 до k ;

$U_{0:k}$ – набір керувальних входів від часу 0 до k ;

$Z_{0:k}$ – набір спостережень від часу 0 до k ;

M – набір орієнтирів або карт;

$M_{k|k-1}$ – оцінювання карти в момент часу k з огляду на попередню карту в момент часу $k-1$.

Оскільки ми розглядаємо ймовірнісну форму *SLAM*, у кожен момент часу k хочемо обчислити функцію розподілу ймовірностей:

$$P(x_k, M | Z_{0:k}, U_{0:k}). \quad (4)$$

Щоб продовжити, потрібно застосувати рекурсивний метод, який оперує апіорними даними $P(x_{k-1|k-1}, M_{k-1|k-1} | Z_{0:k-1}, U_{0:k-1})$, оновлюваними за допомогою u_k і z_k .

Для цього спочатку необхідно визначити модель руху, що передбачає стан за вхідним сигналом керування $P(x_k | x_{k-1}, u_k)$, таким чином:

$$\begin{aligned} &P(x_{k|k-1}, M_{k|k-1} | Z_{0:k-1}, U_{0:k}) = \\ &= \int P(x_{k|k-1} | x_{k-1|k-1}, u_k) \times \\ &\times P(x_{k-1|k-1}, M_{k-1|k-1} | Z_{0:k-1}, U_{0:k-1}) dx_{k-1|k-1}. \end{aligned} \quad (5)$$

Аналогічно також потрібно визначити модель сприймання або спостереження $P(z_{i,k} | X_k, M)$, яка пов'язує інформацію датчика щодо виявлення i в час k з оцінкою стану, таким чином:

$$P(x_{k|k}, M_{k|k} | Z_{0:k}, U_{0:k}) = \frac{P(z_{i,k} | x_{k|k-1}, M_{k|k-1})}{P(x_{k|k-1}, M_{k|k-1} | Z_{0:k-1}, U_{0:k-1})}. \quad (6)$$

Початково проблему максимізації апостеріорної ймовірності в алгоритмі *SLAM* вирішували за допомогою розширеного фільтра Калмана (*EKF*). Він зменшує невизначеність та надає оцінку на кожному кроці алгоритму. Використовуючи

ймовірнісну модель, *EKF* гарантує збіжність та послідовність карти. Однак він дуже чутливий до помилок асоціації даних, а постійне оновлення всіх орієнтирів та їх матриці коваріації потребує значного обчислювального зусилля. На рис. 1 зображено блок-схему процесу *EKF-SLAM*. Сучасні підходи до вирішення проблеми *MAP* використовують оптимізаційні методи, зокрема *Bundle-Adjustment (BA)* [8], або глибокі нейронні мережі [9].



Рис. 1. Блок-діаграма процесу *EKF-SLAM*

Коли екстероцептивні дані надходять у час t , стан робота на цей момент визначається за допомогою рівняння (5), а виявлені ознаки порівнюються з тими, що є на мапі. Збіги дозволяють оновлювати стан і карту з допомогою рівняння (6). Якщо виявлення немає на мапі, воно ініціалізується, якщо це можливо, і додається до неї. Це виконується рекурсивно.

На рис. 2 показано процес *SLAM* і зображені всі змінні, що використовуються в цьому розділі.

Траєкторія із сірими трикутниками побудована на основі оцінок, а траєкторія із білими трикутниками є "правдивою", побудованою на основі реальних фактів.

На цьому кроці ми обчислили як крок передбачення, так і крок оновлення, і *SLAM* може бути поданий як ітеративна оцінка для наступного рівняння, що є комбінацією (5) і (6):

$$P(x_{k|k}, M_{k|k} | Z_{0:k}, U_{0:k}) = \frac{P(z_{k,i} | x_{k|k-1}, M_{k|k-1}) \times \int P(x_{k|k-1} | x_{k-1|k-1}, u_k)}{P(x_{k-1|k-1}, M_{k-1|k-1} | Z_{0:k-1}, U_{0:k-1})} dx_{k-1|k-1} \quad (7)$$

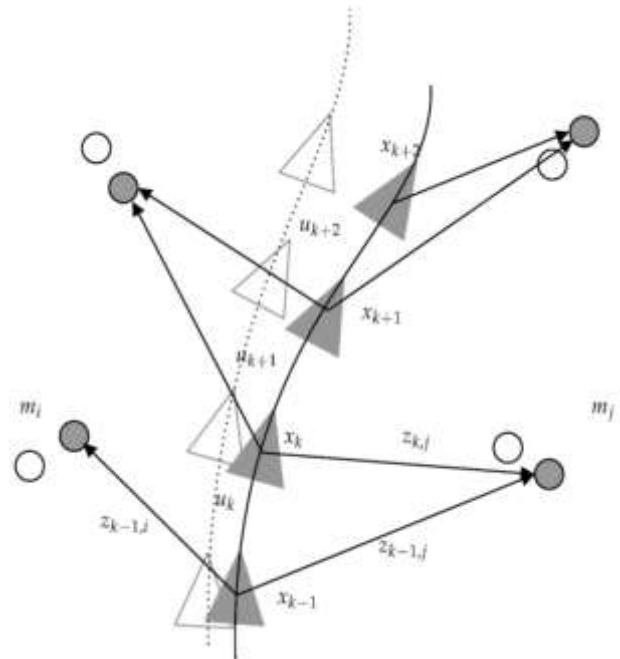


Рис. 2. Ілюстрація процесу *SLAM* та позначки [4]

Рівняння (7) надає рекурсивний байєсівський метод для реалізації *SLAM*. Розв'язання проблеми *SLAM* має обробляти відповідні обчислення для моделі руху й моделі сприйняття, щоб ефективно розрахувати рекурсивний метод. Сучасні підходи, як правило, використовують механізацію вимірювання інерціальної вимірювальної установки як крок передбачення або припущення руху транспортного засобу (сталий швидкісний рух, сталі прискорення руху тощо). Щодо моделі спостереження, то за умови візуального *SLAM* вона часто ґрунтується на моделі зворотної глибини або на класичній перспективній моделі огляду. Щодо *LiDAR*-, *RGB-D*- або *RADAR*-підходів, то модель спостереження значно спрощується, оскільки спостереження є прямим *2D/3D*-вимірюванням *3D*-простору.

$$P2D = \Pi(P3D, K, T), \quad (8)$$

де $T = [R, t]$ – жорстке перетворення, що забезпечує *6D*-позу датчика, K – внутрішні параметри датчика, а $\Pi(\cdot)$ – функція перспективної проєкції. Як видно, цю функцію потрібно перевернути, щоб відповідати класичній моделі спостереження ($P3D = g(P2D, K, T)$). Однак така інверсія не є простою, тому крок оцінювання часто відкладається до додаткового спостереження *P2D*. Потім виконується триангуляція $P3D_{map}$.

Метод лазерного сканування (*LiDAR-SLAM*)

LiDAR може виявляти відстань до перешкод, і це є найкращим датчиком для побудови сіткової карти, що відображає структуру й перешкоди на площині руху робота. У ранніх дослідженнях *SLAM* часто використовували *LiDAR* як основний датчик. Розширений фільтр Калмана (*EKF*) застосовується для оцінювання положення робота, але продуктивність не була ідеальною. Для деяких сильно нелінійних систем цей метод спричинить більшу кількість помилок відрізання, унаслідок чого матимемо неточне позиціонування та картографування. Були запропоновані підходи, основані на фільтрах частинок, оскільки вони ефективно уникають нелінійних проблем, але це також призводить до проблеми зі збільшенням обчислювальної складності та зі зростанням кількості частинок. 2007 р. *Grisetti* запропонував важливий метод *LiDAR-SLAM*, названий *Gmapping*. Він ґрунтується на *Rao-Blackwellized*-фільтрах частинок (*RBPF*), який збільшує точність позиціонування та зменшує обчислювальну складність шляхом покращення запропонованого розподілу та адаптивної техніки перевірки [10].

Як альтернатива ймовірнісним підходам, останніми роками популярні оптимізаційні методи. 2010 р. *Kurt Konolige* запропонував представницький метод *Karto-SLAM*, що використовує розріджене коригування положення, щоб вирішити проблему безпосереднього матричного розв'язання в нелінійній оптимізації. *Hector SLAM* [10], запропонований 2011 р., оцінює застосування методу Гаусса–Ньютона для вирішення проблеми сканування відповідності. Цей метод не потребує інформації відометра, але вимагає високоточного *LiDAR*. 2016 р. *Google* запропонувала метод під назвою *Cartographer*, застосувавши лазерне замкнення петлі до підмап та глобальної карти. Завдяки цьому методу накопичувана похибка зменшується [5].

Візуальна одометрія (*Visual-SLAM*)

Використання візуальних сенсорів для побудови карти середовища є ще одним актуальним напрямом для навігації роботів. На відміну від *LiDAR-SLAM*, *Visual-SLAM* є складнішим, оскільки зображення містить занадто багато інформації, але має труднощі у вимірюванні відстані. Оцінювання руху робота способом зіставлення виокремлених ознак

зображення за різними позами для побудови карти ознак є загальним методом для *Visual-SLAM*.

Mono-SLAM, запропонований 2007 р., вважається походженням багатьох *Visual-SLAM*. Розширений фільтр Калмана (*EKF*) використовується як зворотний елемент для відстеження розріджених ознак у передній частині. Невизначеність виражена функцією щільності ймовірності. З моделі спостереження та рекурсивних обчислень отримують середнє та дисперсію апостеріорного розподілу ймовірності. У роботі використовується *RBPF* для реалізації *Visual-SLAM*. Цей метод уникнув проблеми нелінійності та має високу точність, але потребує значної кількості частинок, що підвищує обчислювальну складність. *PTAM* є репрезентативною роботою з *Visual-SLAM*, яка запропонувала простий і ефективний метод виділення ключових кадрів, а також паралельну структуру реального часу для відстеження та зворотної нелінійної оптимізації картографування. Уперше запропоновано ідею розділення передньої та задньої частини, що призвело до структурного проєктування багатьох методів *SLAM*.

ORB-SLAM [10] вважається віхою візуальної *SLAM*. Застосувавши функції *Oriented FAST* і *Rotated BRIEF (ORB)* та модель "мішок слів" (*BOW*), цей метод може створити в реальному часі стабільну карту особливостей навколишнього середовища в багатьох ситуаціях. Виявлення петель та їх закриття через *BOW* є вагомим внеском цієї роботи, адже ефективно запобігає кумулятивній помилці та може бути швидко відновлене після втрати відстеження.

Останнім часом, на відміну від методів на основі особливостей, досліджувалися директивні методи візуальної *SLAM* шляхом оцінювання руху робота через значення пікселів безпосередньо. Густинне вирівнювання зображень на основі кожного пікселя зображень, запропоноване в джерелі, може побудувати густу 3D-карту оточення. У процесі роботи з джерелом було побудовано напівгусту карту способом оцінювання значень глибини пікселів із великим градієнтом на зображенні. *Engel* тощо запропонували алгоритм *LSD-SLAM (Large-Scale Direct Monocular SLAM)*. Ядро цього алгоритму полягає в застосуванні безпосереднього методу до напівгустого монокулярного *SLAM*, що мало бути попередньо. 2014 р. *Forster* та інші запропонували *SVO (Semi-Direct Monocular Visual Odometry)*, що називається "розрідженим прямим методом", який поєднує ключові точки особливостей з прямими

методами для відстеження деяких ключових точок (наприклад, кутів), а потім оцінює рух камери та її положення відповідно до інформації навколо ключових точок. Цей метод працює швидко для безпілотних літальних апаратів (UAV), додавши спеціальні обмеження та оптимізацію до таких застосувань.

Камера *RGB-D* може надавати інформацію як про колір, так і про глибину в полі зору. Вона є найбільш ефективним датчиком для створення повної *3D*-карти сцени. У роботі пропонується метод *Kinect fusion*, що використовує зображення глибини, отримані з *Kinect*, для вимірювання мінімальної відстані кожного пікселя на кожному кадрі та об'єднує всі зображення глибини для глобальної карти інформації. Крім того, конструюється функція помилки за допомогою фотометричної та геометричної інформації пікселів зображення. Положення камери отримується шляхом мінімізації функції помилки. Проблема картографування розглядається як подання графа положення. Робота є кращим безпосереднім методом *RGB-D SLAM*. Цей метод поєднує помилку інтенсивності та помилку глибини пікселів як функції помилки й мінімізує функцію витрат, щоб отримати оптимальне положення камери. Цей процес реалізовується за допомогою *g2o*. Запропоновано метод вилучення ключових кадрів на основі ентропії та метод виявлення замкненого контура, що значно зменшує помилку маршруту [5].

Об'єднання інформації з декількох сенсорів

Введення даних допоміжних датчиків може покращити стійкість системи *SLAM*. На сьогодні для *LiDAR-SLAM* і *Visual-SLAM* найбільш часто використовуються допоміжні сенсори – енкодер та інерціальна вимірювальна одиниця (*IBO*), які можуть надавати додаткову інформацію про рух робота. Системи *SLAM* з такими допоміжними сенсорами зазвичай працюють краще.

Останнім часом на основі робіт *LiDAR-SLAM* та *Visual-SLAM* деякі вчені почали досліджувати інтеграції цих двох основних сенсорів [11–15]. У праці [11] автори застосували візуальний одометр з метою надання початкових значень для двовимірного лазерного методу ітеративного замикання точок (*ICP*) на невеликому БПЛА та досягли хороших результатів у реальному часі та точності. У дослідженні [12] запропоновано графову структуру на основі *SLAM* з монокулярною камерою та лазером із припущенням, що стіна

перпендикулярна до землі та вертикально плоска. У роботі [13] інтегруються різні передові методи *SLAM* на основі зору, лазера та інерціальних вимірювань за допомогою розширеного фільтра Калмана для БПЛА в приміщенні. У дослідженні [14] представлено метод локалізації, оснований на співпраці між повітряними й наземними роботами в закритому приміщенні, де сенсор *RGB-D* та *2D-LiDAR* прикріплені до БПЛА для створення *2,5D*-карти висот і його локації. Метод оцінювання масштабу та корекції дрейфу способом поєднання монолазерного далекоміра й камери для моно-*SLAM* описано в праці [15]. У роботі [16] запропоновано візуальну *SLAM*-систему, що поєднує зображення, отримані з камери, і розріджену глибинну інформацію, отриману з *3D-LiDAR*, за допомогою прямого методу. У дослідженні [17] виконано фузію *EKF* на позиції, обчислені модулем *LiDAR* та модулем зору, і запропоновано покращену стратегію для відстеження візуальної *SLAM*, коли втрачається об'єкт. З камерою та *LiDAR* стають стандартними конфігурації для роботів, а фузія лазерної та візуальної інформації стане нагальною темою досліджень для *SLAM*, оскільки вона може забезпечити більш стійкий результат для реального застосування [5].

Проблематика застосування

Загалом, методи *LiDAR-SLAM* будують карту зайнятості сітки, яка готова для планування маршруту та керування навігацією. Однак для будівництва більших карт потрібне виявлення та корекція замкненого циклу, що не є легким завданням для сіткової карти. Оскільки отримані способом сканування дані є двовимірними хмарами точок, що не мають явних ознак і дуже схожі між собою, виявлення замкненого циклу на основі результатів сканування безпосередньо часто є неефективним. І цей недолік також поширюється на швидку функцію переміщення, коли робот працює із заданою картою. У навігаційному пакеті, що надається операційною системою *ROS*, робот потребує ручного введення початкової позиції перед автоматичною навігацією та рухом.

З іншого боку, більшість підходів *Visual-SLAM* створюють карти ознак, що добре підходять для локалізації, але не ефективні для планування маршруту. *RGB-D* або *3D-LiDAR* здатні побудувати повну *3D*-сцену, але це обмежено використанням через високу вартість обчислення або розміщення.

Для споживчих роботів вартість датчиків та оброблювального обладнання є чутливою. Маломіцні датчики *LiDAR* стають популярними. Однак створення надійної системи навігації низької вартості не є легкою роботою. Оскільки маломіцні датчики *LiDAR* мають значно гірші характеристики щодо частоти, роздільної здатності та точності, ніж звичайні датчики. У багатьох працях, наприклад [18], уже запропоновані методи для покращення точності зведення сканування для маломіцних датчиків *LiDAR*, проте це ефективно лише для сусідніх позицій. Акумулявання похибок може швидко наростати та призводити до невдачі в будівництві більших карт. Знайти ефективне та надійне рішення *SLAM* і переміщення з низькою вартістю обчислення та розміщення все ще є викликом для комерційно застосовуваних сервісних роботів [5].

Метод співпраці датчиків 2D LRF та RGB-D

У статті пропонується метод локалізації інтелектуального робота за допомогою співпраці датчиків лазерного сканування (2D LRF) та глибинного відтворення зображень (RGB-D) для побудови 2,5D-мапи картографування.

У побудові більш складних репрезентацій, ніж 2D, для забезпечення правильного подання навколишнього середовища, використовуються 3D-репрезентації та 3D-сенсори.

SLAM 2,5D-картографування середовища – це метод, який застосовується в системах *SLAM*, де карта середовища подана у вигляді 2,5D-карти висоти.

2,5D-карта висоти – це вид картографічної інформації, що містить висотні дані про територію з деяким рівнем деталізації. Вона є двовимірним зображенням, де кожний піксель містить інформацію про висоту точки над поверхнею землі. На відміну від 3D, карти 2,5D відтворюють тільки вертикальні висотні дані, а не повні 3D-моделі.

Подання 2,5D-картографування

Це подання ґрунтується на двовимірній сітці квадратних комірок ($C_{ij}, i, j \in \mathbb{N}$). Кожна точка в тривимірній хмарі точок перетворюється в систему координат робота та проектується на площину XY , накладаючись на комірку сітки C_{ij} . Локальна сіткова мапа має розмір $N_{rows} \times N_{columns}$, роздільна

здатність s_{cell} на комірку та координати центра мапи ($p_m^o = x_m^o, y_m^o$). Перетворення між декартовими координатами (x, y) та сітковими координатами (i, j) задається таким чином:

$$(i, j) \leftarrow \left(\frac{x - x_m^o + \frac{s_{cell}}{2}}{s_{cell}} + \frac{N_{cols}}{2}, \frac{y - y_m^o + \frac{s_{cell}}{2}}{s_{cell}} + \frac{N_{rows}}{2} \right). \quad (9)$$

Перетворення координат сітки (i, j) у декартові координати (x, y) задається так:

$$(x, y) \leftarrow \left(s_{cell} \left(i - \frac{N_{cols}}{2} \right) + x_m^o, s_{cell} \left(j - \frac{N_{rows}}{2} \right) + y_m^o \right). \quad (10)$$

Кожна комірка в сітці містить два можливі значення: порожнє, якщо в цій комірці немає точки, або з найменшим і найбільшим значеннями z -координат точок, які належать до цієї комірки. Висотний воксель отримується на основі значень висоти комірок (приклад зображено на рис. 3).

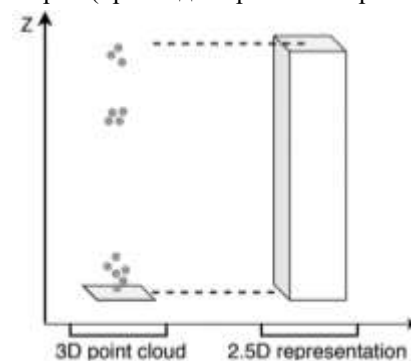


Рис. 3. 2,5D-подання [19]

Для отримання координат локальної карти в глобальних координатах застосовується жорстке перетворення. Для цього, початкова глобальна 2D-карта конвертується у 2,5D-карту, де кожній комірці призначається мінімальна й максимальна висота. Ця мапа оновлюється висотними вокселями, отриманими з локальної карти. Було розроблено алгоритм трасування 3D-ліній для висотних вокселів, щоб обчислити вільний простір між датчиком і кожним висотним вокселем. Координати датчика й кожного висотного вокселю проектується на площину 2D-сітки карти. Комірки на лінії з 3D-датчика до висотного вокселю обчислюються за допомогою алгоритму Брезенхема [20]. Для кожного висотного вокселю відомі мінімальні та максимальні значення висоти, та визначаються дві лінійні моделі від датчика, що надають вільний висотний воксель для кожної комірки (рис. 4).

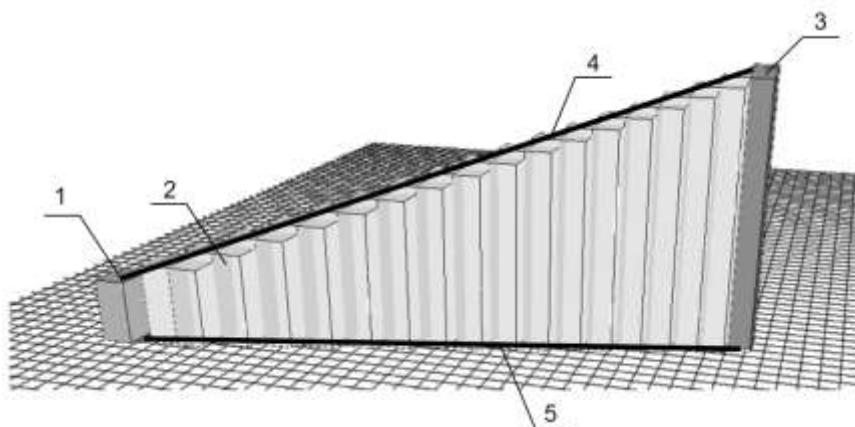


Рис. 4. Трасування лінії для одного вимірюваного висотного вокселю [19]

Перший датчик зображений під номером 1, вільні висотні вокселі – під номером 2, вимірюваний висотний воксель позначений номером 3, а лінії, що з'єднують максимальне та мінімальне значення z , – номерами 4 та 5 відповідно.

Подання, що генерується з 3D-хмари точок, надає оновлення карти, заданої заздалегідь, змінюючи мінімальні та максимальні значення висоти кожної комірки за допомогою згаданого алгоритму. Усі комірки, ідентифіковані алгоритмом Брезенхема, які містять дані, перекриваються з відповідним вільним висотним вокселем. Розглядаючи мінімальні та максимальні значення висоти висотного вокселю (h_{min}, h_{max}) та вільного висотного вокселю (fh_{min}, fh_{max}), маємо такі спостереження відповідно до перелічених нижче правил.

1. Якщо вільний висотний воксель перекривається знизу висотного вокселю, то мінімальне значення висоти оновлюється до fh_{max} (рис. 5, a).

2. Якщо вільний висотний воксель перекривається зверху висотного вокселю, то максимальне значення висоти оновлюється до fh_{min} (рис. 5, b).

3. Якщо жоден вільний висотний воксель не перекривається з висотним вокселем, то змін не відбувається (рис. 5, c).

4. Якщо вільний висотний воксель повністю перекриває висотний воксель, то інформація вилучається (рис. 5, d).

5. Якщо висотний воксель з вільною висотою є частиною висотного вокселю, то використовується індекс Жаккара, також відомий як "перетин-об'єднання" (IoU). Оцінка визначається як відношення площі перетину до площі об'єднання. Якщо оцінка більша за 0,5, то вилучаються дані, в іншому разі жодних змін не відбувається (рис. 5, e).

Висотний воксель зображено білим, а вільний висотний воксель з вільною висотою – світло-сірим кольором.

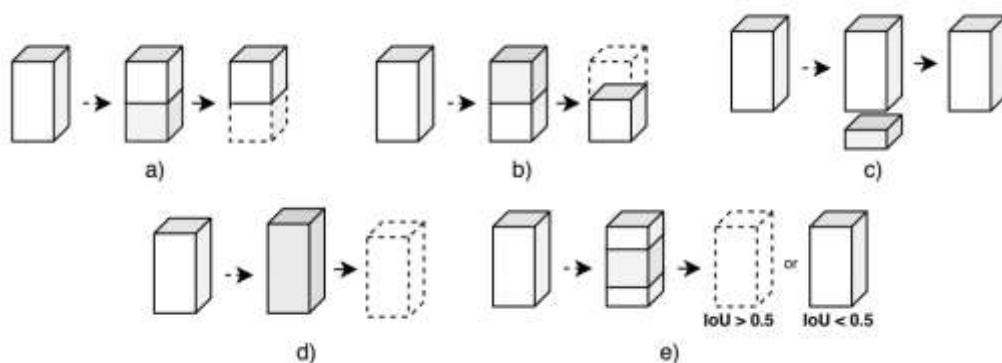


Рис. 5. Ілюстрація методу перекриття для оновлення 2,5D-карти [19]

Картографування та локалізація у 2,5D

У цьому підході фільтр на основі KLD оцінює позу робота, використовуючи результати одометрії,

апріорну 2D-карту та 3D-хмару точок, і генерує оновлену 2,5D-карту. Маємо 3D-хмару точок, що обробляється для отримання локального подання у вигляді 2,5D. Спочатку задана апріорна 2D-карта,

яка перетворюється на 2,5D-карту, як описано вище. Карта 2,5D регулярно оновлюється за допомогою позиції, оціненої фільтром, та локального подання. Глобальна й локальна карти також описані вище.

Як показано на рис. 6, обчислення ваги частинок ґрунтується на апіорній 2,5D-карті, локальній та глобальній карті.

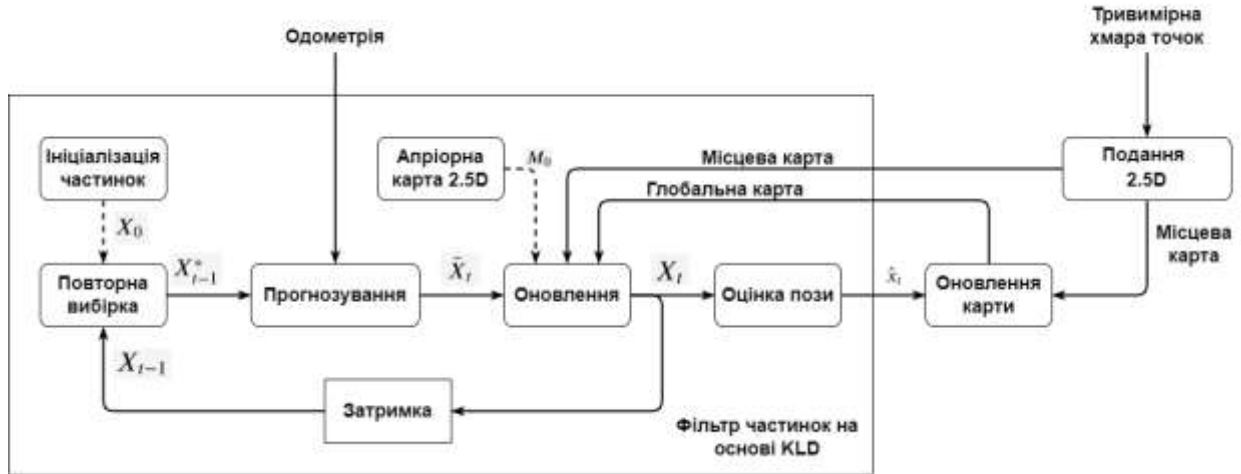


Рис. 6. Діаграма фільтра частинок на основі KLD

На діаграмі фільтра частинок на основі KLD X_0 – початковий набір частинок; X_{t-1} та X_t – попередній та поточний набори частинок; X_{t-1}^* – переставлений попередній набір частинок; \bar{X}_t – фактичний передбачений набір; \hat{x}_t – фактично оцінена поза; M_0 – початкова 2,5D-карта; *LocalMap* та *GlobalMap* – локальна та глобальна карти, отримані з модуля картографування.

Крок оновлення фільтра на основі KLD описаний в алгоритмі етапу оновлення (рис. 7) і має на вході частинку від даних із локальної та глобальної карти. Обчислення ваги частинки виконується в рядках 2–7, та деякі вокселі локальної 2,5D-карти пропускаються (ігноруючи

C вокселів для всіх оброблених вокселів), щоб зменшити час оброблення. Кожен обраний воксель перетворюється у світову систему координат, застосовуючи жорстку трансформацію (рядок 3) і потім використовується в процедурі пошуку найближчого сусіднього вокселю. Ця процедура шукає в глобальній 2,5D-карті найближчий воксель до обраного вокселю (з локальної 2,5D-карти) та повертає координати вокселю, що має найвищий перетин (IoU) з обраним вокселем. У рядку 5 вага обчислюється шляхом різниці між обраним вокселем і вокселем (отриманим із процедури найближчого сусіда) в нормальних розподілах N_x та N_y .

```

Data: Particle  $x_i^{[n]} = \{x_i^{[n]}, y_i^{[n]}, \theta_i^{[n]}\}$ , set of voxels from the local map (LM), set of voxels from the global map (GM)
and  $C$  a constant.
1  $w_i^{[n]} \leftarrow 0, j \leftarrow 0;$ 
2 for  $i = 1; i < \text{size}(\text{LM}); i = i + C$  do
3    $p^{[t]} \leftarrow \text{transform}(x_i^{[n]}, LM_{x'}^t, LM_{y'}^t, LM_{z_{min}}^t, LM_{z_{max}}^t);$  // Transforms the selected voxel to the world
   frame
4    $(x_z^t, y_z^t) \leftarrow \text{nearest}(p^{[t]}, GM);$  // Checks neighborhood
5    $w_i^{[n]} \leftarrow w_i^{[n]} + \mathcal{N}_x(0, p^{[t]}_x - x_z^t) \cdot \mathcal{N}_y(0, p^{[t]}_y - y_z^t);$ 
6    $j \leftarrow j + 1;$ 
7 end
8  $w_i^{[n]} \leftarrow \frac{w_i^{[n]}}{j};$ 
9 return  $w_i^{[n]}$ 
    
```

Рис. 7. Алгоритм етапу оновлення [19]

Результати досліджень

Для проведення моделювання було прийнято рішення використовувати операційну систему для роботів ROS, яка пропонує різноманітні способи для розв'язання проблем SLAM [21].

ROS має два основні складники: операційна система *ros*, описана вище, і набір пакетів *ros-pkg*, що підтримуються користувачами та організовані в набори, які називаються стеками. Ці пакети реалізують різні функції робототехніки, такі як SLAM, планування, сприйняття, моделювання тощо [22].

Для візуалізації інтелектуальних роботів і навколишнього середовища були використані пакети *Gazebo* та *Rviz*, які є частиною пакету *Robot Operating System*. *Gazebo* дає змогу моделювати фізичні властивості інтелектуального робота, довкілля, показники різних датчиків тощо. З допомогою *Rviz* можна створювати віртуальну модель робота та візуалізувати карти, маршрути, інформацію датчиків.

Різницю між ними можна підсумувати цитатою з книги "Програмування роботів з ROS" М. Квіглі – одного з розробників ROS: "*Rviz* демонструє, що відбувається на думку робота, а *Gazebo* показує, що відбувається насправді".

Сцена тестового приміщення (рис. 8–9) створена за допомогою інструментів *Gazebo (Gzweb)* та пакетів *AWS RoboMaker*.

AWS RoboMaker – хмарний сервіс імітаційного моделювання, що надає розробникам роботів змогу запускати, масштабувати й автоматизувати імітаційне моделювання без необхідності керувати якоюсь інфраструктурою. *Gzweb* – це клієнт *WebGL* для *Gazebo*.

Планування руху мобільного робота є складним завданням, що має враховувати не тільки об'єкти, відображені на карті, а й ті, які відсутні на ній під час побудови. Наприклад, якщо на шляху з'являється новий об'єкт, потрібно розпізнати його та перебудувати маршрут. Для вирішення цього

завдання ROS надає набір пакетів, що називається навігаційним стеком, який об'єднує компоненти *move_base* та *amcl*.

Навігаційний стек ROS – двовимірний. Він отримує інформацію про позицію мобільної бази, одометрії та потоків датчиків і виводить команди безпечної швидкості для мобільної бази. Для побудови маршруту навігаційний стек використовує набір пакетів, зокрема *map_server* для 2D-карт, *amcl* для локалізації на мапі, повідомлення датчиків та одометрії, а також *move_base* для об'єднання всіх повідомлень і виведення команди швидкості. Навігаційний стек зберігає інформацію про перешкоди в середовищі у двох картах витрат. Глобальна карта витрат використовується для довгострокового планування всього середовища, тоді як локальна карта витрат застосовується для нетривалого планування й уникнення перешкод.

Під час симуляції моделювання навколишнього середовища (рис. 10, 11) отримано й порівняно карту 2D-LIDAR (рис. 12) та 2,5D-карту висот (рис. 13).

Щоб скласти початкову карту довкілля, було записано серію точок шляху. Ці маршрутні точки маневрували мобільною платформою з її початкового положення за межами простору, у кількох кімнатах і навколо них, і поверталися назад у вихідне положення. Це привело до повторюваного шляху з достатнім покриттям датчика з метою підтримки розроблення карти середовища. Щоб створити карту сітки зайнятості, яка застосовуватиметься для майбутнього планування шляху, вихід датчика *Kinect* був змінений, щоб він виглядав як вихідний результат лазерного сканування. Датчик *Kinect* надає інформацію про глибину в тривимірній хмарі точок. Однак для 2D-картографування все, що необхідно, – це серія зображень глибини на одній висоті. Це зменшує витрати на обчислення та значно спрощує навігацію в базових середовищах.



Рис. 8. Сцена тестового приміщення (вигляд спереду)

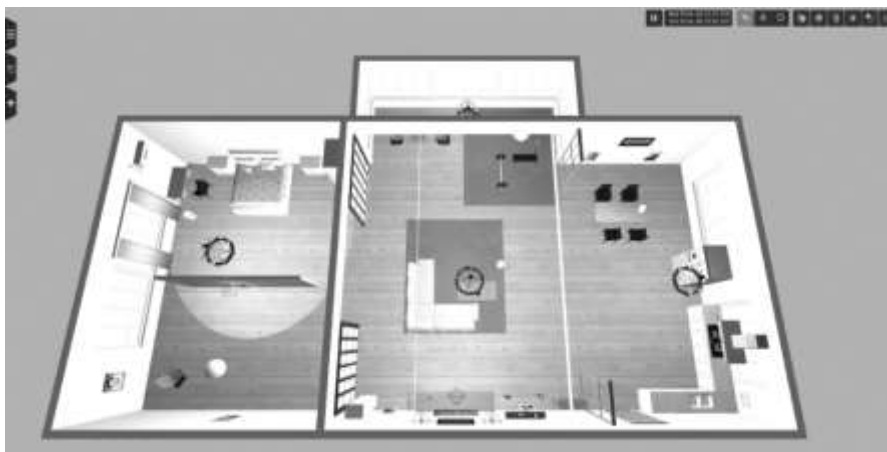


Рис. 9. Сцена тестового приміщення (вигляд зверху)

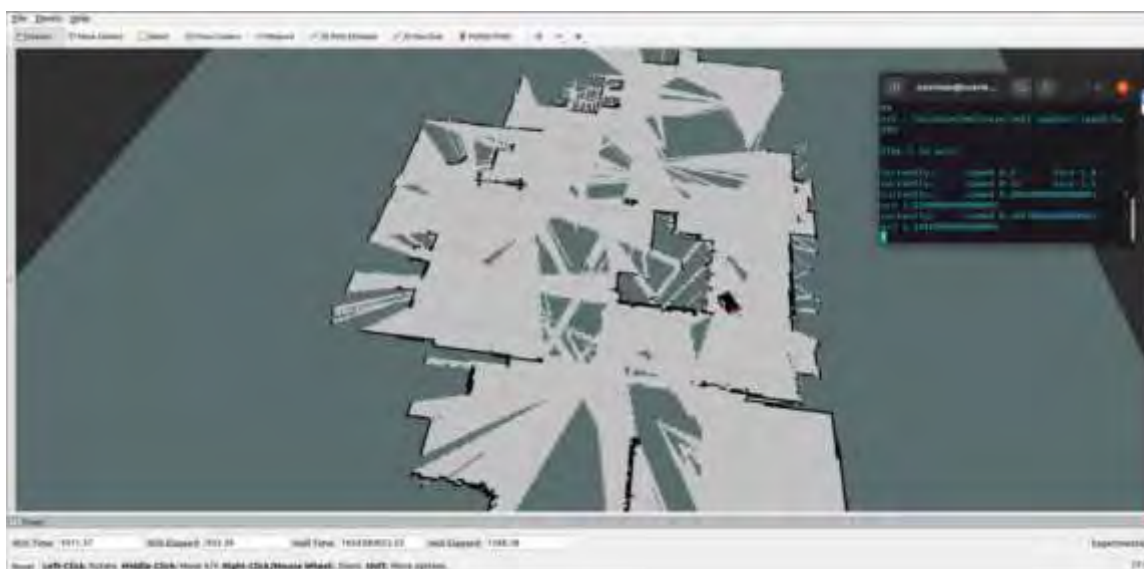


Рис. 10. Процес симуляції моделювання 2D-картографування

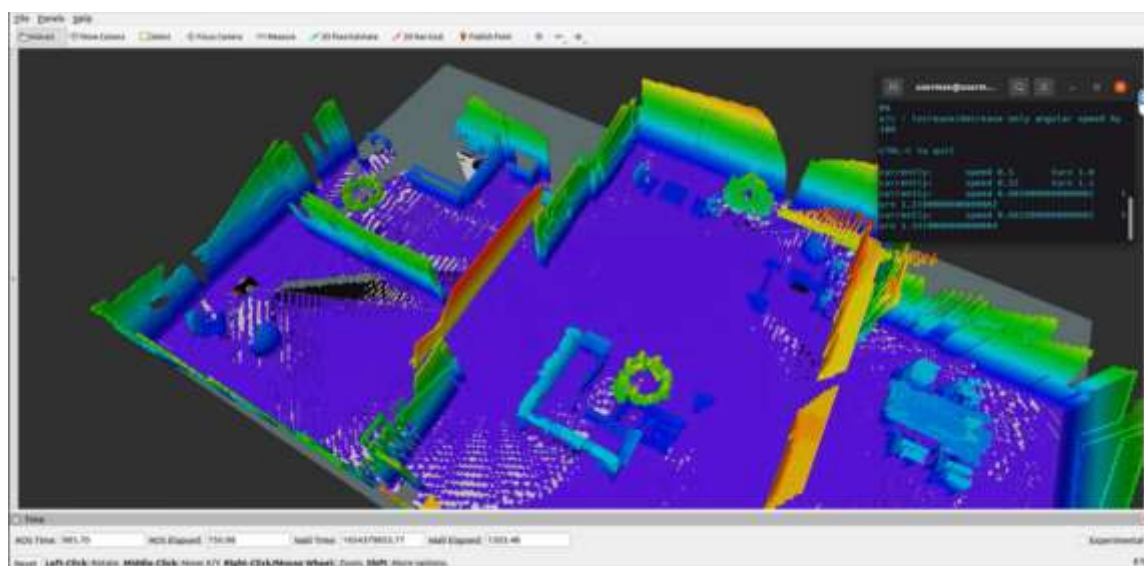


Рис. 11. Процес симуляції моделювання 2,5D-картографування

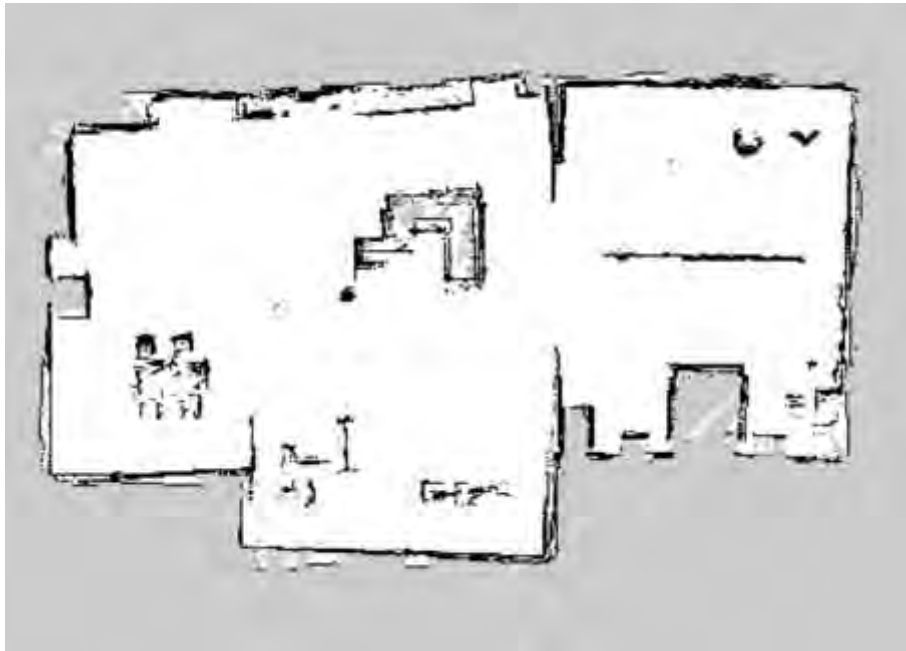


Рис. 12. Отримане 2D-просторове середовище

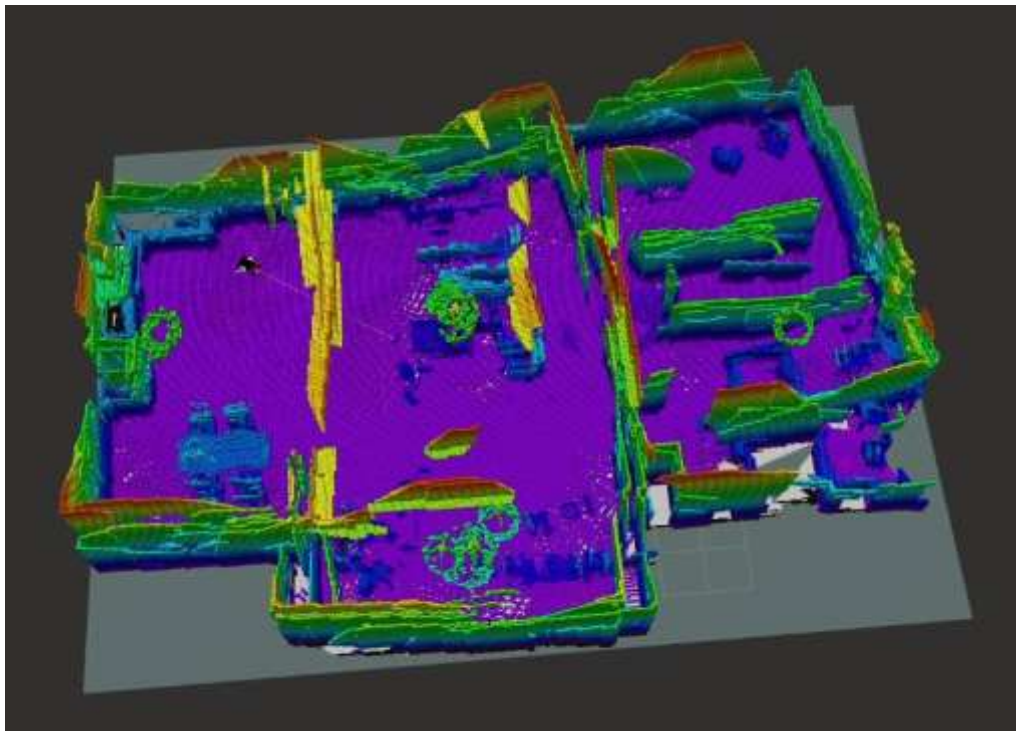


Рис. 13. Отримана 2,5D-карта висот

Навігаційний стек зберігає інформацію про перешкоди у світі у двох картах витрат. Глобальна карта витрат використовується для довгострокового планування всього середовища, тоді як локальна карта витрат – для нетривалого планування й уникнення перешкод. Один файл конфігурації містить параметри, спільні для обох карт витрат,

тоді як інші файли конфігурації мають параметри, властиві для глобальної або локальної карти витрат. Це створює локальний йі глобальний план, що можна візуалізувати. Крім того, і локальні, і глобальні карти витрат можна унаочнити, щоб відобразити перешкоди, виявлені в навколишньому середовищі (рис. 14).

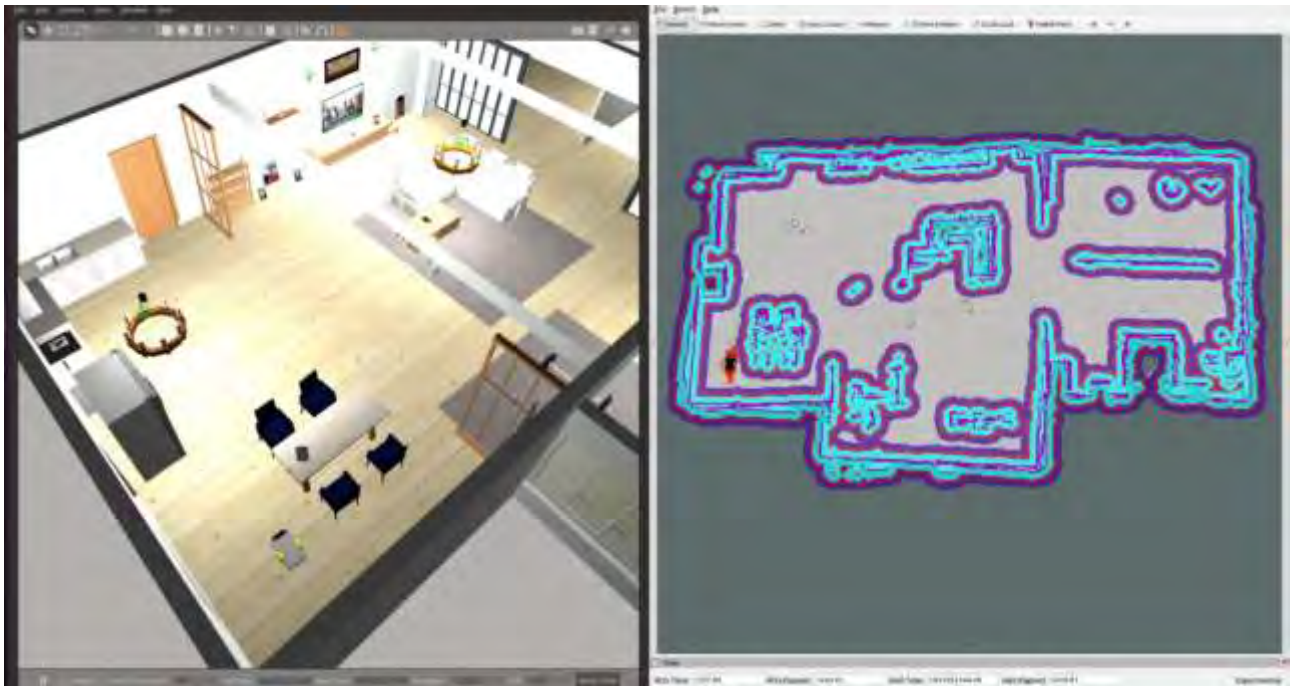


Рис. 14. Візуалізація карт вартості планування шляху

На рис. 14 можна бачити 3D-модель приміщення (ліворуч) та приклад результату автономної навігації інтелектуального робота з використанням раніше згенерованої 2,5D-карти.

Висновки й перспективи подальшого дослідження

У статті подано результати моделювання алгоритму методу локалізації інтелектуального робота за допомогою співпраці датчиків лазерного сканування (2D LRF) та глибинного відтворення зображень (RGB-D) для побудови 2,5D-карти довкілля інтелектуального робота. Це дало змогу провести симуляцію роботи методу 2,5D-картографування та визначити місце розташування й орієнтацію мобільного робота в просторі в режимі реального часу за допомогою пакетів ROS.

Наразі 2D-сканування не здатне виявити певні перешкоди через їх висоту, тоді як 3D-сканування містить великі обсяги даних, що потрібно обчислити для картографування. Це ускладнює використання алгоритмів у режимі реального часу. Щоб вирішити ці проблеми, у статті запропоновано 2,5D-метод відображення висот.

Порівняно методи 2D/3D- та 2,5D-картографування й зроблено конкретні висновки.

Підхід 2,5D-картографування та локалізації є меншим обчислювальним бар'єром завдяки простоті його подання. Результати, здобуті для 2,5D-картографування та локалізації, показують, що цей підхід якісно відтворює довкілля та успішно локалізує робота на карті 2,5D. Оцінено позиції робота за умови використання лазерного сканування та 3D-хмари точок як вхідних даних. Крім того, результати є послідовними в процесі розгляду тестів з оновленням карти 2,5D та без оновлення.

Здобуті результати є обнадійливими й демонструють потенціал роботи об'єднаних методів SLAM, що співпрацюють для забезпечення точного виконання одночасної локалізації та картографування інтелектуальних роботів у режимі реального часу.

Такий підхід розширює технології, не замінюючи наявні робочі пропозиції, і дає змогу використовувати сучасні методи для всебічного виявлення та розпізнавання довкілля з допомогою ефективного локалізаційного й картографічного підходу, надаючи більш точні результати з використанням менших ресурсів. У подальших дослідженнях плануємо вдосконалити запропонований метод для навігації автономних інтелектуальних роботів у процесі використання на пересічній місцевості з урахуванням перепадів висот.

Список літератури

1. Nevliudov I., Novoselov S., Sychova O., Mospan D. Multithreaded Software Control of Industrial Manipulator Movement, *IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*. Kremenchuk, Ukraine. 2022. P. 1–6. DOI: 10.1109/MEES58014.2022.10005675
2. Сухачов К. Сучасні методи одночасної локалізації і картографування в режимі реального часу. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку*. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції. Черкаси, 2023. С. 77–79. URL: <https://conference.ikto.net/>
3. Nevliudov I., Novoselov S., Sychova O., Tesliuk S. Development of the Architecture of the Base Platform Agricultural Robot for Determining the Trajectory Using the Method of Visual Odometry. *IEEE XVII-th International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)*. Polyana (Zakarpattya). Ukraine. 2021. P. 64–68. DOI: 10.1109/MEMSTECH53091.2021.9468008
4. Khan M. S. A. et al. Investigation of Widely Used SLAM Sensors Using Analytical Hierarchy Process. *Journal of sensors*. 2022. Vol. 2022. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/5428097>
5. Jiang G. et al. A simultaneous localization and mapping (SLAM) framework for 2.5D map building based on low-cost lidar and vision fusion. *Applied sciences*. 2019. Vol. 9, № 10. 2105. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9102105>
6. Rosas-Cervantes A. et al. Sensors Multi-Robot 2.5 D localization and mapping using a monte carlo algorithm on a multi-level surface. *208 MDPI Journals Awarded Impact Factor*. 2021. Vol. 21. № 13. 4588. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21134588>
7. Debeunne C., Vivet D. A review of visual-lidar fusion based simultaneous localization and mapping. *Sensors*. 2020. Vol. 20. №. 7. 2068. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20072068>
8. Bustos A. P. et al. Visual SLAM: why bundle adjust? *International conference on robotics and automation (ICRA)*. Montreal, QC, Canada. 20–24 May. 2019. 1043. DOI: <https://doi.org/10.1109/icra.2019.8793749>
9. O'Mahony N. et al. Deep learning for visual navigation of unmanned ground vehicles: a review. *29th Irish signals and systems conference (ISSC)*. Belfast. 21–22 June 2018. 859. DOI: <https://doi.org/10.1109/issc.2018.8585381>
10. Freitas C. M. Autonomous navigation with simultaneous localization and mapping in/outdoor: master's thesis. 2020. URL: <https://hdl.handle.net/10216/128968>
11. Lynen S. et al. A robust and modular multi-sensor fusion approach applied to MAV navigation. *IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS 2013)*. Tokyo. 3–7 November. 2013. 6290. DOI: <https://doi.org/10.1109/iros.2013.6696917>
12. Oh T. et al. Graph structure-based simultaneous localization and mapping using a hybrid method of 2D laser scan and monocular camera image in environments with laser scan ambiguity. *Sensors*. 2015. Vol. 15. № 7. P. 15830–15852. DOI: <https://doi.org/10.3390/s150715830>
13. López E. et al. A multi-sensorial simultaneous localization and mapping (SLAM) system for low-cost micro aerial vehicles in gps-denied environments. *Sensors*. 2017. Vol. 17. № 4. 802. DOI: <https://doi.org/10.3390/s17040802>
14. Nam T., Shim J., Cho Y. A 2.5D map-based mobile robot localization via cooperation of aerial and ground robots. *Sensors*. 2017. Vol. 17. №. 12. 2730. DOI: <https://doi.org/10.3390/s17122730>
15. Zhang Z. et al. Scale estimation and correction of the monocular simultaneous localization and mapping (SLAM) based on fusion of 1D laser range finder and vision data. *Sensors*. 2018. Vol. 18. №. 6. 1948. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18061948>
16. Shin Y.-S., Park Y. S., Kim A. Direct visual SLAM using sparse depth for camera-lidar system. *IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*. Brisbane, QLD, Australia. 21–25 May 2018. P. 5144–5151. DOI: <https://doi.org/10.1109/icra.2018.8461102>
17. Xu Y., Ou Y., Xu T. SLAM of robot based on the fusion of vision and LIDAR. *IEEE international conference on cyborg and bionic systems (CBS)*. Shenzhen. 25–27 October 2018. 2058. DOI: <https://doi.org/10.1109/cbs.2018.8612212>
18. Jiang, G. et al. FFT-Based Scan-Matching for SLAM Applications with Low-Cost Laser Range Finders. *Applied sciences*. 2018. Vol. 9. № 1. 41. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9010041>
19. Alves S. A. F. T. Particle-Filter based 3D mapping, localization and SLAM for indoor mobile robot navigation: master's thesis. 2019. URL: <http://hdl.handle.net/10316/87952>
20. Bresenham J. E. Algorithm for computer control of a digital plotter. *IBM Systems Journal*. 1965. Vol. 4. № 1. P. 25–30. DOI: <https://doi.org/10.1147/sj.41.0025>
21. Joseph L. Learning Robotics using Python: Design, simulate, program, and prototype an autonomous mobile robot using ROS, OpenCV, PCL, and Python, 2nd Edition. Packt Publishing, 2018. 280 p.

22. Nevliudov I., Sychova O., Reznichenko O., Novoselov S., Mospan D., Mospan V. Control System for Agricultural Robot Based on ROS. *IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. Kremenchuk, Ukraine. 2021. P. 1–6. DOI: 10.1109/MEES52427.2021.9598560

References

1. Nevliudov, I., Novoselov, S., Sychova, O., Mospan, D. (2022), "Multithreaded Software Control of Industrial Manipulator Movement", *IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine. P. 1–6. DOI: 10.1109/MEES58014.2022.10005675
2. Sukhachov, K. (2023), "Modern methods of simultaneous localization and mapping in real time mode" ["Suchasni metody odnochasnoi lokalizatsii i kartohrafuvannia v rezhymi realnoho chasu"]. *Automation and computer-integrated technologies in production and education: status, achievements, development prospects*. All-Ukrainian scientific and practical Internet conference, Cherkasy, P. 77–79. available: <https://conference.ikto.net/>
3. Nevliudov, I., Novoselov, S., Sychova, O., Tesliuk, S. (2021), "Development of the Architecture of the Base Platform Agricultural Robot for Determining the Trajectory Using the Method of Visual Odometry", *IEEE XVII-th International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)*, Polyana (Zakarpattia), Ukraine, P. 64–68. DOI: 10.1109/MEMSTECH53091.2021.9468008
4. Khan, M. S. A. et al. (2022), "Investigation of Widely Used SLAM Sensors Using Analytical Hierarchy Process", *Journal of sensors*, Vol. 2022, P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/5428097>
5. Jiang, G. et al. (2019), "A simultaneous localization and mapping (SLAM) framework for 2.5D map building based on low-cost lidar and vision fusion", *Applied sciences*, Vol. 9, № 10, 2105. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9102105>
6. Rosas-Cervantes, A. et al. (2021), "Sensors Multi-Robot 2.5 D localization and mapping using a monte carlo algorithm on a multi-level surface", *208 MDPI Journals Awarded Impact Factor*, Vol. 21. № 13. 4588. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21134588>
7. Debeunne, C., Vivet, D. (2020), "A review of visual-lidar fusion based simultaneous localization and mapping", *Sensors*, Vol. 20, № 7, 2068. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20072068>
8. Bustos, A. P. et al. (2019), "Visual SLAM: why bundle adjust?", *International conference on robotics and automation (ICRA)*, Montreal, QC, Canada, 20–24 May, 1043. DOI: <https://doi.org/10.1109/icra.2019.8793749>
9. O'Mahony, N. et al. (2018), "Deep learning for visual navigation of unmanned ground vehicles: a review", *29th Irish signals and systems conference (ISSC)*, Belfast, 21–22 June, 859. DOI: <https://doi.org/10.1109/issc.2018.8585381>
10. Freitas, C. M. "Autonomous navigation with simultaneous localization and mapping in/outdoor: master's thesis", 2020, available at: <https://hdl.handle.net/10216/128968>
11. Lynen, S. et al. (2013), "A robust and modular multi-sensor fusion approach applied to MAV navigation", *IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS 2013)*, Tokyo, 3–7 November, 6290. DOI: <https://doi.org/10.1109/iros.2013.6696917>
12. Oh, T. et al. (2015), "Graph structure-based simultaneous localization and mapping using a hybrid method of 2D laser scan and monocular camera image in environments with laser scan ambiguity", *Sensors*, Vol. 15, № 7, P. 15830–15852. DOI: <https://doi.org/10.3390/s150715830>
13. López, E. et al. (2017), "A multi-sensorial simultaneous localization and mapping (SLAM) system for low-cost micro aerial vehicles in gps-denied environments", *Sensors*, Vol. 17, № 4, 802. DOI: <https://doi.org/10.3390/s17040802>
14. Nam, T., Shim, J., Cho, Y. A. (2017), "2.5D map-based mobile robot localization via cooperation of aerial and ground robots", *Sensors*, Vol. 17, № 12, 2730. DOI: <https://doi.org/10.3390/s17122730>
15. Zhang, Z. et al. (2018), "Scale estimation and correction of the monocular simultaneous localization and mapping (SLAM) based on fusion of 1D laser range finder and vision data", *Sensors*, Vol. 18, № 6, 1948. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18061948>
16. Shin, Y.-S., Park, Y. S., Kim, A. (2018), "Direct visual SLAM using sparse depth for camera-lidar system", *IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*, Brisbane, QLD, Australia, 21–25 May 2018, P. 5144–5151. DOI: <https://doi.org/10.1109/icra.2018.8461102>
17. Xu, Y., Ou, Y., Xu, T. (2018), "SLAM of robot based on the fusion of vision and LIDAR", *IEEE international conference on cyborg and bionic systems (CBS)*, Shenzhen, 25–27 October. 2058. DOI: <https://doi.org/10.1109/cbs.2018.8612212>
18. Jiang, G. et al. (2018), "FFT-Based Scan-Matching for SLAM Applications with Low-Cost Laser Range Finders", *Applied sciences*, Vol. 9, № 1. 41. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9010041>
19. Alves, S. A. (2019), "Particle-Filter based 3D mapping, localization and SLAM for indoor mobile robot navigation: master's thesis", available at: <http://hdl.handle.net/10316/87952>
20. Bresenham, J. E. (1965), "Algorithm for computer control of a digital plotter", *IBM Systems Journal*, Vol. 4, № 1, P. 25–30. DOI: <https://doi.org/10.1147/sj.41.0025>
21. Joseph, L. (2018), *Learning Robotics using Python: Design, simulate, program, and prototype an autonomous mobile robot using ROS, OpenCV, PCL, and Python, 2nd Edition*, Packt Publishing, 280 p.
22. Nevliudov I., Sychova O., Reznichenko O., Novoselov S., Mospan D., Mospan V. (2021), "Control System for Agricultural Robot Based on ROS", *IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, P. 1–6. DOI: 10.1109/MEES52427.2021.9598560

Відомості про авторів / About the Authors

Невлюдов Ігор Шакирович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харків, Україна; e-mail: igor.nevlyudov@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9837-2309>

Новоселов Сергій Павлович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харків, Україна; e-mail: sergiy.novoselov@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3190-0592>

Сухачов Костянтин Ігорович – Харківський національний університет радіоелектроніки, магістр кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харків, Україна; e-mail: kostiantyn.sukhachov@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-2277-9822>

Nevlyudov Igor – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Head at the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine.

Novoselov Sergiy – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor at the Department of Computer Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine.

Sukhachov Konstantin – Kharkiv National University of Radio Electronics, Master's degree at the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation, and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine.

METHOD OF SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND MAPPING FOR CONSTRUCTION OF 2.5D MAPS OF THE ENVIRONMENT USING ROS

SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) is a relevant topic of research and development in the field of robotics and computer vision. SLAM finds wide applications in various areas such as autonomous navigation of intelligent robots, solving problems in augmented and virtual reality, UAVs, and other systems. In recent years, SLAM has made significant progress due to the gradual development of its algorithms, the use of advanced sensors, and improvements in computational power of computers. **The subject** of this study is modern methods of real-time simultaneous localization and mapping. **The goal** of the research is to model the developed algorithm for constructing maps of the surrounding environment and determining the position and orientation of the intelligent robot in space in real-time using ROS packages. **The purpose** of this article is to demonstrate the results of combining SLAM methods and developing new approaches to solve simultaneous localization and mapping problems. In order to achieve the set objectives, a collaboration of laser scanning (2D LRF) and depth image reconstruction (RGB-D) **methods** was utilized for simultaneous localization and mapping of the intelligent robot and construction of a 2.5D environment map. The obtained **results** are promising and demonstrate the potential of the integrated SLAM methods, which collaborate to ensure accurate execution of simultaneous localization and mapping for intelligent robots in real-time mode. The proposed method allows for considering obstacle heights in constructing the map of the surrounding environment while requiring less computational power. **In conclusion**, this approach expands technologies without replacing existing working propositions and enables the use of modern methods for comprehensive detection and recognition of the surrounding environment through an efficient localization and mapping approach, providing more accurate results with fewer resources utilized.

Keywords: SLAM; ROS; 2D LRF; RGB-D; 2.5D height map; simultaneous localization and mapping methods; intelligent robot; position estimation; modeling and simulation.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Невлюдов І. Ш., Новоселов С. П., Сухачов К. І. Метод одночасної локалізації та картографування для побудови 2,5D-карти навколишнього середовища засобами ROS. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 2 (24). С. 145–160. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.145>

Nevlyudov, I., Novoselov, S., Sukhachov, K. (2023), "Method of simultaneous localization and mapping for construction of 2.5D maps of the environment using ROS", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (24), P. 145–160. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.145>

D. TESLENKO, A. SOROKINA, A. KHOVRAT, N. HULIEV, V. KYRIY

COMPARISON OF DATASET OVERSAMPLING ALGORITHMS AND THEIR APPLICABILITY TO THE CATEGORIZATION PROBLEM

The **subject** of research in the article is the problem of classification in machine learning in the presence of imbalanced classes in datasets. The **purpose** of the work is to analyze existing solutions and algorithms for solving the problem of dataset imbalance of different types and different industries and to conduct an experimental comparison of algorithms. The article solves the following tasks: to analyze approaches to solving the problem – preprocessing methods, learning methods, hybrid methods and algorithmic approaches; to define and describe the oversampling algorithms most often used to balance datasets; to select classification algorithms that will serve as a tool for establishing the quality of balancing by checking the applicability of the datasets obtained after oversampling; to determine metrics for assessing the quality of classification for comparison; to conduct experiments according to the proposed methodology. For clarity, we considered datasets with varying degrees of imbalance (the number of instances of the minority class was equal to 15, 30, 45, and 60% of the number of samples of the majority class). The following **methods** are used: analytical and inductive methods for determining the necessary set of experiments and building hypotheses regarding their results, experimental and graphic methods for obtaining a visual comparative characteristic of the selected algorithms. The following **results** were obtained: with the help of quality metrics, an experiment was conducted for all algorithms on two different datasets – the Titanic passenger dataset and the dataset for detecting fraudulent transactions in bank accounts. The obtained results indicated the best applicability of SMOTE and SVM SMOTE algorithms, the worst performance of *Borderline* SMOTE and *k-means* SMOTE, and at the same time described the results of each algorithm and the potential of their usage. **Conclusions:** the application of the analytical and experimental method provided a comprehensive comparative description of the existing balancing algorithms. The superiority of oversampling algorithms over undersampling algorithms was proven. The selected algorithms were compared using different classification algorithms. The results were presented using graphs and tables, as well as demonstrated in general using heat maps. Conclusions that were made can be used when choosing the optimal balancing algorithm in the field of machine learning.

Keywords: categorization; machine learning; methods of balancing; data generation methods; dataset; unbalanced datasets.

Introduction

Unbalanced data classification is a problem in which the proportional sizes of the classes in a dataset differ significantly. In this case, at least one class has only a few samples – the minority class – and the rest falls into another class – the majority class (Fig. 1).

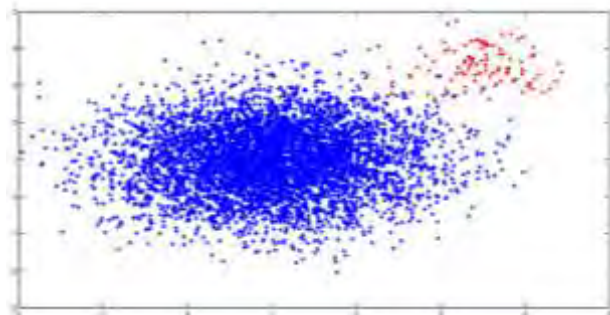


Fig. 1. An example of an unbalanced data problem [1]

This problem affects the performance of the classifier, which can be seen from the fact that when training on an unbalanced dataset, the algorithm begins to adjust to the influence of a more numerous class,

which causes a shift in accuracy. This means that machine learning decisions are made with different efficiency on the majority and minority classes, and the classifier distinguishes samples of certain classes with greater accuracy, namely samples of the majority classes, and the results of identifying samples with low accuracy are in the minority classes. This is because classifiers strive to achieve the best possible results during training. Since "normal" observations are predominant in number, ML algorithms focus on learning the behavior of the "normal" class [2]. Consequently, the model can achieve greater accuracy due to the fact that it pays more attention to studying the properties and identifying the majority class rather than a uniform distribution of powers. This is because, for example, in very unbalanced datasets, the algorithm will have good accuracy even if it always categorizes any instances as members of the majority class [3].

One of the main obstacles in learning from imbalanced data is that the minority class is usually the class of interest, which is often the case in applications such as medical diagnosis, face recognition, tampering, error, or fraudulent transaction detection [5]. The most

popular methods used to eliminate or ignore data imbalance are synthesizing new instances of the minority class, oversampling the minority class, undersampling the minority class, and a method of tuning the cost function of learning algorithms to make misclassification of minority class samples more important than misclassification of majority class samples [6]. This makes it possible to achieve a more unbiased attitude of ML algorithms to classes.

Analysis of recent research and publications

The problem of unbalanced data distribution is quite common in applied problems. There are three main approaches to classification based on unbalanced data.

Also, approaches to solving imbalance problems in data classification are sometimes divided into the following: preprocessing methods, *cost-sensitive* learning methods, hybrid methods, and algorithmic approaches.

The study will focus on methods of preprocessing datasets. Below is a diagram illustrating the hierarchy of approaches (Fig. 2).

Pre-processing approaches are those that are performed on the training data. They are divided into *Sampling Methods* and *Feature Selection and Extraction*.

Pre-processing methods are used to obtain more balanced training data. Pre-processing approaches are also called data-driven approaches and work by directly acting on the data space in an attempt to reduce the imbalance ratio between classes.

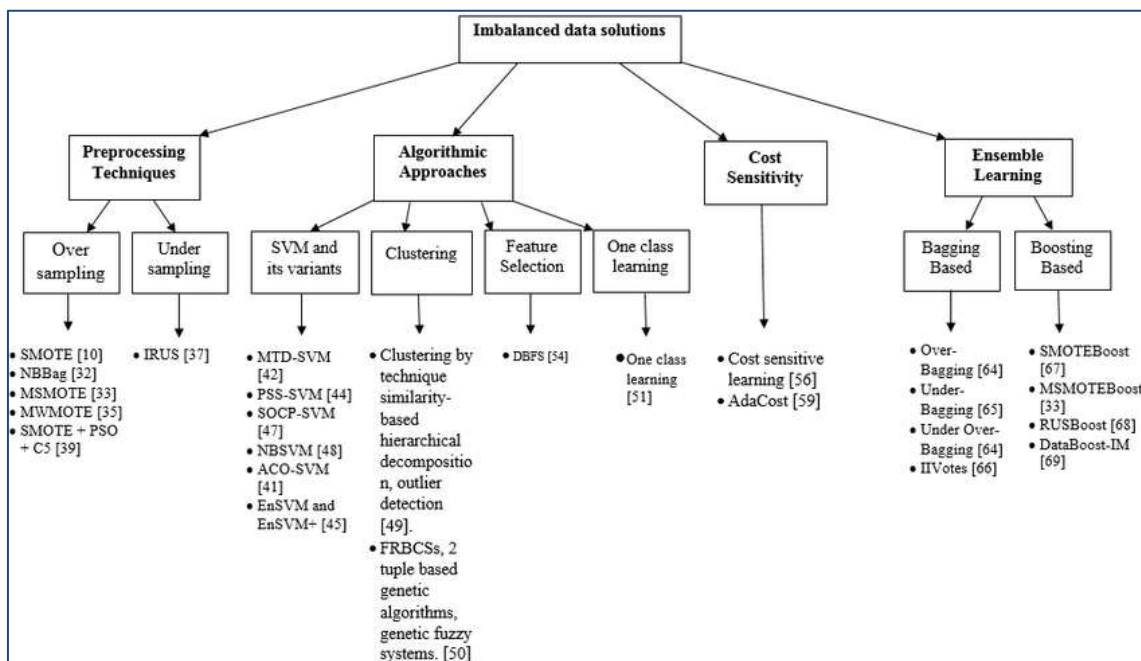


Fig. 2. Classification of approaches for unbalanced data [7]

Sampling Methods is a simple and popular approach for balancing the class distribution of training data. The original data space is balanced by using one of the methods to eliminate redundant instances or generate somehow insufficient information in the sample. The main idea of resampling data instances is to obtain balanced classes. This process is repeated until a balanced dataset is achieved. The resampling approach is based on techniques that eliminate the imbalanced set by adding or removing samples from the dataset to reduce the biased behavior of the unbalanced dataset, thus resizing the training dataset.

Another approach, *Feature Selection and Extraction*, is the selection of a subset of relevant features or attributes from large data sets. It helps to improve the performance of the classifier.

The sampling approach, in turn, is divided into three more variants:

- undersampling of the majority class – creating a subset of the original data by removing selected samples from the class, i.e., selecting the dominant data from the majority class and selecting a number of examples of each category that is too large compared to the others (Fig. 3);

– oversampling of the minority class – creating a superset of the original dataset, or forming new samples from existing ones, or replicating existing ones, i.e. replicating examples of the minority class and artificially

"reproducing" examples of all categories with a smaller presence (Fig. 3);

– hybrid methods that combine the previous two approaches for a more natural distribution of data.

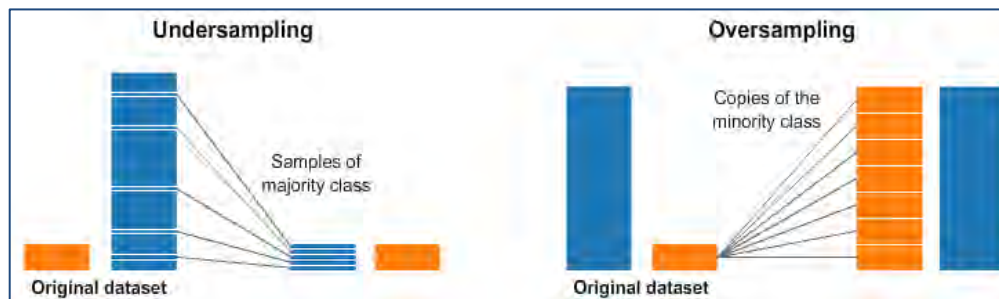


Fig. 3. Undersampling and oversampling [8]

The simplest methods of preprocessing a dataset are *Random Undersampling* (RU) and *Random Oversampling* (RO). The main disadvantage of random oversampling is that it can discard potentially useful data that is important for training. On the other hand, for random oversampling, overfitting can occur, as this process generates exact copies of existing instances. To prevent this situation, other solutions have been proposed. For example, in the SMOTE algorithm (Synthetic Minority Oversampling Technique), "artificial" minority class instances are generated by interpolating several randomly selected adjacent minority instances (nearest neighbors) to increase the number of minority class instances in the training set. Nearest neighbors are found by Euclidean distance. The SMOTE algorithm generates the same amount of synthetic data for each original minority instance without considering the neighboring examples from the majority classes. This can increase the frequency of overlap between classes. Therefore, some variants of the method have been proposed to reduce the noticeable limitations, namely *Borderline-SMOTE*, *SMOTE SVM*, etc.

Overview of oversampling algorithms

One way to deal with the problem of unbalanced data is to create new samples in underrepresented classes. The most naïve strategy is to create new samples by randomly selecting and replacing the current available samples [9]. In the RO algorithm, the selected samples are simply copied randomly in order to increase the importance of the minority class.

As a result, the majority class does not dominate the others during the learning process. Thus, all classes are represented by the decision function. In addition, *Random Oversampler* allows to select data of mixed type.

The SMOTE algorithm synthesizes new minority instances between existing (real) minority instances. SMOTE draws lines between the instances of the minority class and then represents the new, synthetic minority instances somewhere on these lines [10]. If there are instances in the minority class that are distant and appear in the majority class, this creates a problem for SMOTE. The algorithm can start creating a linear bridge with the majority class (Fig. 4).

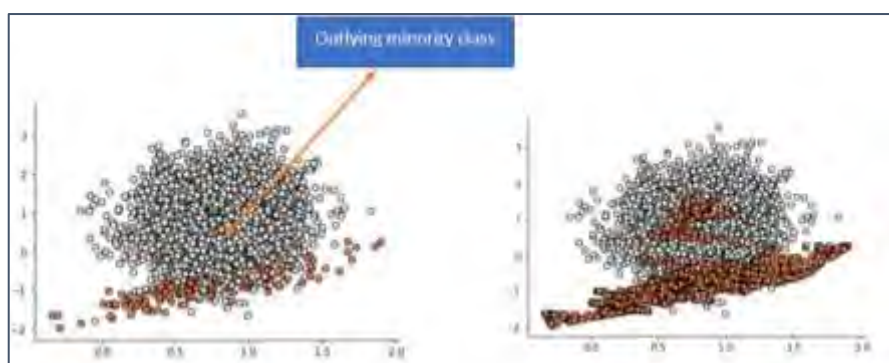


Fig. 4. Disadvantage of the SMOTE algorithm [4]

In this regard, SMOTE offers three additional options for creating samples: *Borderline-SMOTE*, *SMOTE SVM*, and *SMOTE k-means*. These methods focus on samples near the boundary of the optimal decision function and will create samples in the direction opposite to that of the nearest neighbor class.

Recent work on data imbalance has pointed out some important issues related to performance degradation, namely:

- the presence of small disjuncts; this means that the minority class can be divided into many subclusters with very few examples in each, surrounded by examples of the majority class [11];
- overlap between classes; there are often examples from different classes with very similar characteristics, in particular if they are located in areas around the boundaries of solutions between classes.

The problem mentioned in the previous paragraph can be partially solved by the *Borderline-SMOTE* algorithm. It divides samples into three groups (Fig. 5).

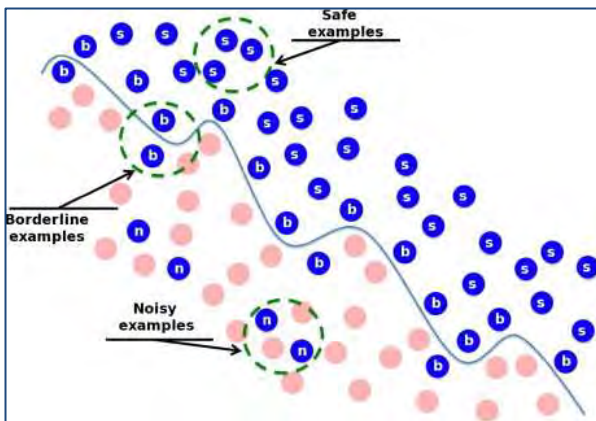


Fig. 5. Types of samples *Borderline-SMOTE* [11]

These groups are:

- *safe* samples – placed in relatively homogeneous areas;
- *noisy* samples from one class present in safe areas of another class;
- *borderline* samples are located in the area surrounding the class boundaries, where either the minority and majority classes overlap or the samples are very close to a complex boundary shape.

The *Borderline-SMOTE* algorithm selects a point that is bordered by another class (but not noise) and performs the same actions as a regular SMOTE.

In *SVM-SMOTE*, the borderline is approximated by support vectors after training the SVM classifier on the training set. Synthetic data is created randomly

along the lines connecting each support vector of the minority class with a number of its nearest neighbors. The peculiarity of *SMOTE SVM* compared to *Borderline-SMOTE* is that it synthesizes more data away from the area of overlapping classes. It focuses more on the areas where the data is separated [12]. Below is a comparison of the SMOTE algorithm types (Fig. 6).

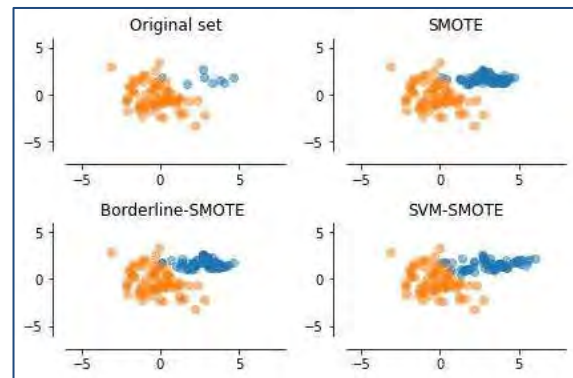


Fig. 6. Distribution of samples after applying SMOTE algorithms

Even from the figure, it can be seen that *SVM-SMOTE* reinforces samples on all minority class boundaries, unlike *Borderline-SMOTE*, which reinforces class boundaries only on the border with another class.

The *k-means-SMOTE* method uses a simple and popular *k-means* clustering algorithm combined with SMOTE resampling to rebalance the data sets. It manages, unlike conventional SMOTE, to avoid noise generation by resampling instances only in safe areas. Furthermore, its focus is on both inter-class imbalance and intra-class imbalance, dealing with the problem of small disjuncts by expanding small minority areas. SMOTE can generate minority samples in majority areas in the presence of noise. Most noiseless samples are generated in already dense minority areas, which contributes to the intra-class imbalance [13].

The *k-means* algorithm works by iteratively repeating two instructions. First, it assigns each observation to the closest of the *k* cluster centroids. Secondly, it updates the position of the centroids so that they are centered between the observations assigned to them. The algorithm converges when no more observations are assigned. It is guaranteed to converge to a typical local optimum in a finite number of iterations.

ADASYN is similar to SMOTE and its derivative algorithm, but it has an important difference. It shifts the sampling space (i.e., the probability that any particular point will be selected for copying) to points that are not located in homogeneous neighborhoods.

The main idea of ADASYN is to create an appropriate number of synthetic alternatives for each observation belonging to the minority class. The concept of "appropriate number" depends on how difficult it is to study the original observation. In particular, an observation from a minority class is "hard to learn" if there are many examples from the majority class with features similar to that observation.

Conducting the experiment

Two datasets were chosen for the experiment: "Credit Cards" [14] and "Titanic" [15].

They are different tasks with different types of data, which made it possible to analyze the performance of different oversampling algorithms on different tasks. Some of them were immediately unbalanced, some were not. Therefore, to make the experiment more clear, we decided to modify the number of instances in the original training datasets. For each dataset, four initial modifications were created that had exactly the same imbalance, where the number of samples in the minority class was equal to 15, 30, 45, and 60% of the majority class. Based on the results obtained, comparative tables, graphs, and diagrams were created to show the degree of accuracy achieved by the algorithms after eliminating the imbalance in different ways. For comparison purposes, the models were also trained on the original datasets to understand how much the chosen approaches improve the training efficiency of ML algorithms.

For some datasets, features were normalized. A scaling technique in which values are shifted and scaled so that they ultimately range from 0 to 1 [16]. Below is the normalization formula:

$$X' = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}, \quad (1)$$

where X_{max} and X_{min} – the maximum and minimum values of the function, respectively.

For many features represented by strings or lists (e.g., class A, B, and C), normalization cannot be applied, so we had to use the *one-hot* encoding algorithm. This is a method of transforming data to prepare it for the algorithm and get a better prediction. With *one-hot*, each categorical value is converted into a new categorical column, and these columns are assigned a binary value of 1 or 0 [17], [18].

The Credit Cards dataset was chosen because it represents an important application problem: companies

want to recognize fraudulent credit card transactions so that their customers are not charged for goods they did not purchase. The dataset contains a set of two types of transactions: normal and fraudulent.

This dataset contains transactions that occurred over two days in September 2013 on European credit cards, where 492 frauds occurred out of 284.807 transactions. The dataset is very unbalanced, with the minority class (fraud) accounting for 0.172% of all transactions. It contains only numeric input variables, which are the result of a PCA (principal component analysis) transformation. Due to confidentiality issues, the authors are unable to provide the original features and additional information about the data. The features are represented as V1, V2, ... V28 and are the principal components obtained by PCA. The only features not transformed by PCA are "Time" and "Quantity". The "Time" function contains the seconds elapsed between each transaction and the first transaction in the dataset. The "Quantity" function (the number of transactions) can be used for cost-dependent learning. The "Class" function is a response variable, and it takes the value of 1 in case of fraud and 0 otherwise.

The "Titanic" dataset was chosen first as one of the most famous datasets. It is a dataset of passengers of a ship that was in the center of a catastrophic event. The main task of the models is to predict whether a passenger will survive based on data about their tickets, financial status, and relatives.

The dataset contains the following features:

- survival is a class variable, 0 indicates that the passenger did not survive, and 1 indicates that he or she did;
- pclass – 1, 2, 3 – passenger's ticket class;
- sex – sex of the passenger;
- age – passenger's age;
- sibsp – siblings / spouses (number of brothers, sisters and spouses on board);
- parch – parents / children (number of parents and children on board);
- ticket – ticket number (deleted field as unnecessary information);
- fare – ticket price;
- cabin – cabin number;
- embarked – port of embarkation.

This dataset does not solve any applied problem, but the categories of passengers are the most random, so it was interesting to analyze this dataset.

To check the quality of the datasets created by oversampling, they were examined and tested by training various ML algorithms. The study used classification algorithms related to supervised machine learning. The selected algorithms were given a training set of features and a test set of training labels known in advance. The models were trained on this data, and during model validation, they received a test dataset without labels.

The following classification models were used:

- logistic regression;
- decision tree;
- support vector machine;
- k -nearest neighbors;
- naive Bayesian classifier.

To analyze and compare the results obtained, it is necessary to use certain metrics. The main metric for data analysis is accuracy (Fig. 7).

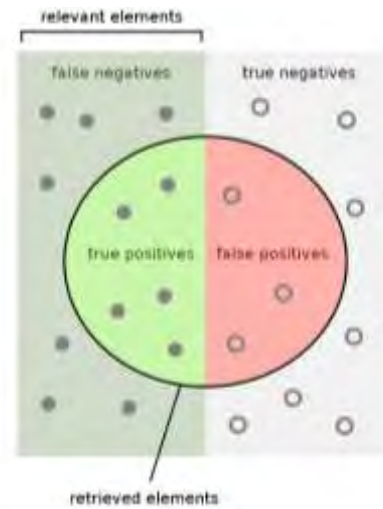


Fig. 7. Schematic representation of metrics

Model accuracy, or *Accuracy*, determines how many correct predictions are made out of those generated by the model. In other words, it can be represented by the following formula:

$$Accuracy = \frac{true\ positive + true\ negative}{true\ positive + true\ negative + false\ positive + false\ negative}, \quad (2)$$

where *true positive* is the number of correctly predicted items;

true negative is the number of correctly unpredicted items;

false positive is the number of incorrectly predicted items;

false negative is the number of incorrectly unpredicted items.

The study involved training five machine learning models on three datasets. Each set was presented in four modifications (with 15, 30, 45, and 60% imbalance).

Each modification was subjected to oversampling, namely six variants. The model was also trained on the unbalanced datasets for further comparison with the experimental datasets. A total of 280 experiments were conducted, the results of which are documented in the form of tables, graphs, and bar charts.

It was decided to present only two tables (one modification of 15% of each dataset) and to include only these results in the report, as they most clearly reflect the experiment. The first one shows the results on the Credit Cards dataset.

Table 1. Model accuracy (Credit Cards dataset, 15% modification)

Oversampling algorithm	Basic unbalanced dataset	ADASYN	Borderline SMOTE	K-Means SMOTE	SMOTE	SVM SMOTE	Random over-sampler
Model training algorithm							
Decision Tree Classifier	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995
K-Neighbors Classifier	0.975	0.990	0.985	0.980	0.990	0.985	0.985
Logistic Regression	0.915	1.000	1.000	0.975	0.975	1.000	0.975
Naive Bayes Classifier	0.990	0.980	0.980	0.995	0.995	0.990	0.990
SVM Classifier	0.975	0.995	0.995	0.990	0.995	0.995	1.000

As you can see from the table, the results are quite different. Some algorithms, such as the k -nearest neighbor classifier, logistic regression, and support vector machine, improved their results, while the decision tree showed exactly the same results on all algorithms,

and the naive Bayesian classifier generally did a better job on unbalanced data.

The following table shows the results of model training on the "Titanic" dataset (Table 2).

Table 2. Model accuracy (Titanic dataset, 15% modification)

Oversampling algorithm	Basic unbalanced dataset	ADASYN	Borderline SMOTE	KMeans SMOTE	SMOTE	SVM SMOTE	Random over-sampler
Model training algorithm							
DecisionTree Classifier	0.849	0.698	0.864	0.849	1.000	0.849	0.834
K-Neighbors Classifier	0.840	0.840	0.837	0.850	0.833	0.861	0.800
Logistic Regression	0.810	0.852	0.867	0.849	0.909	0.972	0.897
Naive Bayes Classifier	0.710	0.812	0.816	0.831	0.816	0.767	0.700
SVM Classifier	0.849	0.879	0.906	0.993	1.000	1.000	0.997

Below are graphs showing the accuracy of the classifiers on datasets with varying degrees of imbalance that have been oversampled, as well as the original dataset, which has not been corrected in any way. Figure 8

demonstrates how the decision tree works on data that has been aligned in different ways. The graph shows the benefits of using oversampling methods compared to the baseline dataset on the "Credit Cards" dataset.

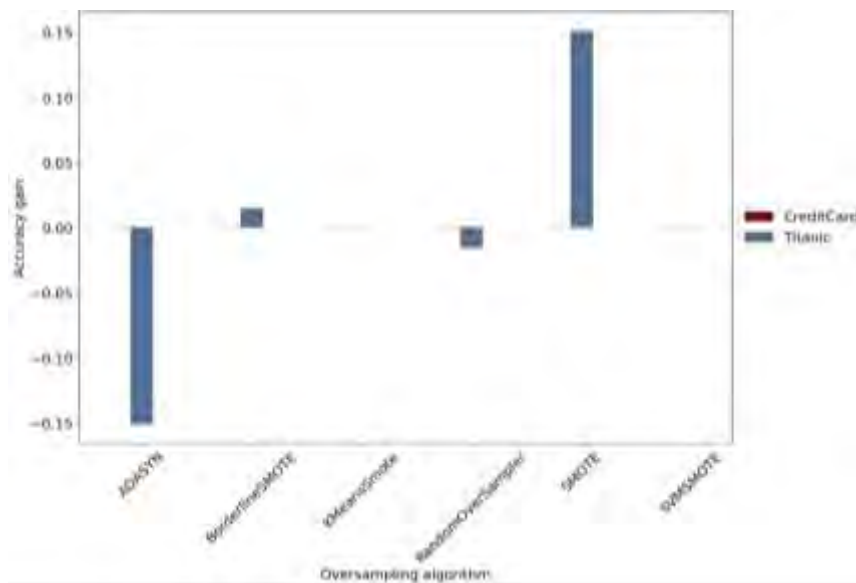


Fig. 8. Advantages of using decision tree algorithms on a 15% dataset

As can be seen from the figure, the Credit Cards dataset shows neither advantages nor disadvantages of using oversampling algorithms. Let's show the same graph for the logistic regression for the sake of representativeness (Fig. 9).

We can see the stable advantages of using each of the oversampling algorithms. The accuracy

of logistic regression for the 60% dataset is shown in Fig. 10.

As can be seen in the graph, oversampling algorithms are most effective when there is a strong imbalance. After conducting all the experiments and calculating the average benefit of using each algorithm, we have the results shown in Fig. 11.

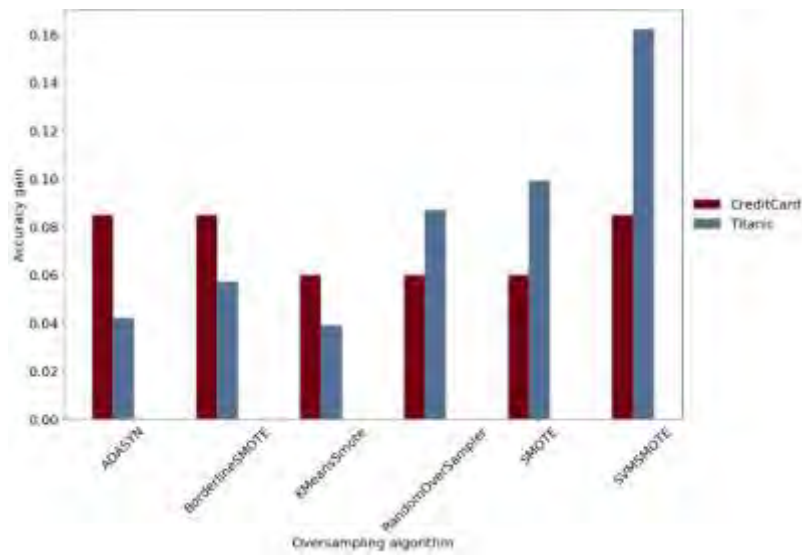


Fig. 9. Advantages of using algorithms with logistic regression on the 15%th dataset

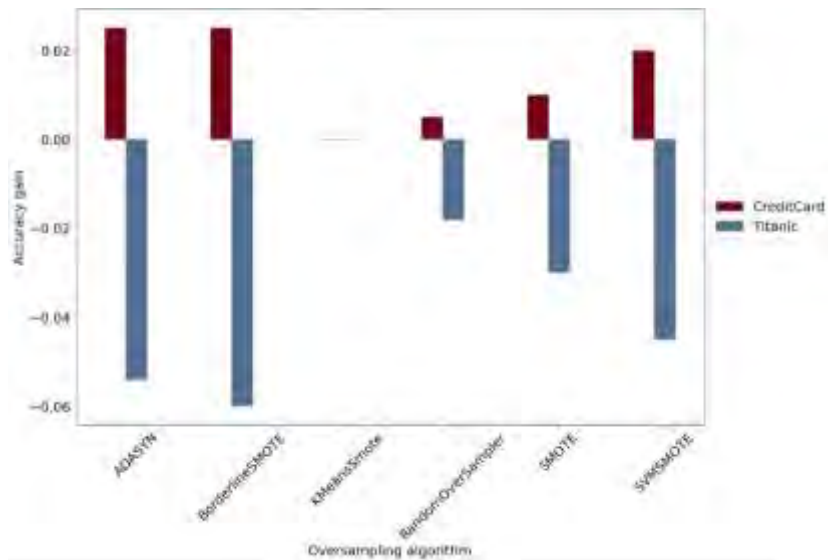


Fig. 10. Advantages of using logistic regression algorithms on 60% of the dataset

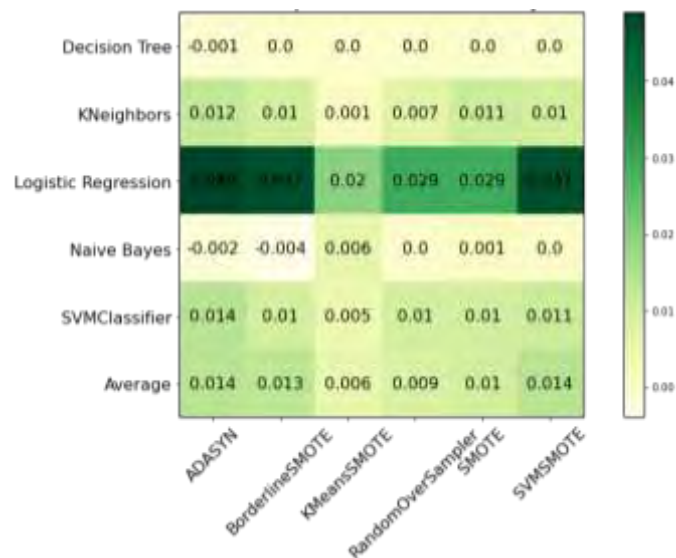


Fig. 11. Heat map of the benefits of using oversampling on the "Credit Cards" dataset

After creating a heat map for the "Titanic" dataset, we have the results shown in Fig. 12.

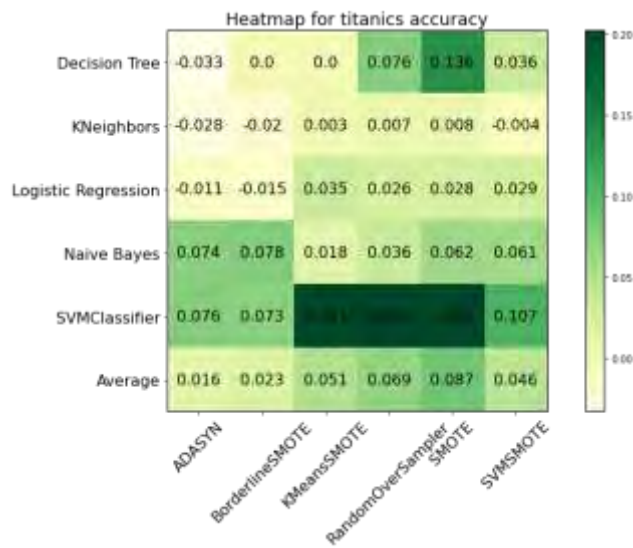


Fig. 12. Heat map of the benefits of using oversampling on the "Titanic" dataset

The bar charts show the absolute increase in accuracy of each model compared to the models trained on unbalanced datasets.

The decision tree demonstrated an increase only for the "Titanic" dataset, but it was quite noticeable (up to 16%). For all other datasets, there was no difference compared to the original dataset, and for the Salary dataset, ADASYN even worsened the result, but by less than 1%.

The *k-nearest-neighbors* algorithm did not perform as well, and for the "Titanic" dataset, oversampling significantly worsened the results. However, as for the Credit Cards dataset, all balancing algorithms yielded an increase in accuracy of 1–2%. This is very noticeable, given that the accuracy of the models before the modification also had a performance of 90% accuracy or more.

Logistic regression yielded very satisfactory results of 15%. It improved the accuracy of both datasets after they were modified for balancing. SVM-SMOTE improved the accuracy of the model on the Titanic dataset by 16%. For the "Credit Cards" dataset, ADASYN, SVM-SMOTE, and *Borderline-SMOTE* performed well at all degrees of imbalance, and for the dataset with only 15% minority class, the accuracy increased by 8%.

For the naïve Bayesian classifier, only the "Titanic" dataset showed much better results with an increase of 4 to 12%. For the most part, the accuracy has not changed. The only exception is the *k-means-SMOTE*

algorithm, which consistently improved the results of the algorithm on the "Credit Cards" dataset. Although, on the contrary, this algorithm was the only one that began to deteriorate the classifier's performance on the "Titanic" dataset.

For the SVM classifier, *Random Oversampling*, *k-means-SMOTE*, and regular SMOTE showed the greatest stability on the "Titanic" dataset, sometimes providing almost 30% increase in accuracy, which allowed us to obtain a 100% accurate model. For "Credit Cards", only ADASYN had such an accuracy, and SVM-SMOTE, *Borderline-SMOTE*, and regular SMOTE performed quite well, which helped to achieve an accuracy of 99.5–100%.

Bar charts show the absolute increase in accuracy of each model compared to models trained on unbalanced datasets. Analyzing the research, I would like to note that there were two different datasets – "Credit Cards" and "Titanic" – that belonged to different types and behaved differently during the training process.

The "Titanic" dataset is less applicable, and models trained on unbalanced datasets typically yielded 70–90% accuracy. Oversampling algorithms gave a huge increase in accuracy (in some cases up to 100%).

The second dataset was the "Credit Cards" dataset, which showed excellent results. Even with an unbalanced dataset, its accuracy rates reached 90% and higher. As for the balancing algorithms, they performed differently, but in most cases they still improved the results by 1–2%, which is an excellent result given such accuracy.

Conclusions

In the course of the study, the balancing of unbalanced datasets was carried out using various algorithms and applied to solving categorization problems. The paper analyzes the problems of a given domain and methods of balancing unbalanced datasets, and considers and investigates six balancing algorithms: *Random Oversampling*, SMOTE, *Borderline-SMOTE*, *k-means-SMOTE*, SVM-SMOTE, and ADASYN.

All the experiments were conducted on two datasets – "Credit Cards" and "Titanic", which demonstrated different performance. The results of the study are presented in the form of graphs, tables, and bar charts representing the accuracy indicators.

The best results were obtained for the "Credit cards" dataset. The data was well selected, the accuracy of the models increased after using almost all algorithm

variants, the completeness increased significantly, but most importantly, the accuracy of the minority class improved. This indicates that it was possible to get rid of the problem without losing the accuracy of the model as a whole.

For the "Titanic" dataset, where there is no clear dependency (unlike "Credit Cards"), many of the

algorithms show a positive trend, and the best RO accuracy is achieved by SMOTE and *k-means*-SMOTE on the SVM classifier model.

The obtained results can be applied if it is necessary to use an unbalanced dataset or for further research in the field of machine learning.

References

- Mary, A. J., Claret, A. (2021), "Imbalanced Classification Problems: Systematic Study and Challenges in Healthcare Insurance Fraud Detection", *5th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*, Tirunelveli, India, P. 1049–1055. DOI: 10.1109/ICOEI51242.2021.9452828
- Srinilta, C., Kanharattanachai, S. (2021), "Application of Natural Neighbor-based Algorithm on Oversampling SMOTE Algorithms", *7th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST)*, Pattaya, Thailand, P. 217–220. DOI: 10.1109/ICEAST52143.2021.9426310
- Das, R., Biswas, S. K., Devi, D., Sarma, B. (2020), "An Oversampling Technique by Integrating Reverse Nearest Neighbor in SMOTE: Reverse-SMOTE," *International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC)*, Trichy, India, P. 1239–1244. DOI: 10.1109/ICOSEC49089.2020.9215387
- Feng, L. (2022), "Research on Customer Churn Intelligent Prediction Model based on Borderline-SMOTE and Random Forest," *IEEE 4th International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS)*, Shenyang, China, P. 803–807. DOI: 10.1109/ICPICS55264.2022.9873702
- Dudjak, M., Martinović, G. (2021), "An empirical study of data intrinsic characteristics that make learning from imbalanced data difficult", *Expert Systems with Applications*, Vol. 182, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115297>
- Liu, C., Jin, S., Wang, D. (2020), "Constrained Oversampling: An Oversampling Approach to Reduce Noise Generation in Imbalanced Datasets with Class Overlapping," *IEEE Access*, Vol. 10, P. 91452–91465. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3018911
- Ali, H., Mohd Salleh, M., Saedudin, R., Hussain, K., Mushtaq, M. (2019). "Imbalance class problems in data mining: a review", *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, No. 14(3), 1552. DOI: 10.11591/ijeecs.v14.i3.pp1552-1563
- Medium (2022), "Undersampling and oversampling: An old and a new approach", available at: <https://medium.com/analytics-vidhya/undersampling-and-oversampling-an-old-and-a-new-approach-4f984a0e8392> (last accessed: 10.05.2023)
- Sandeep Kini, M., Devidas, Smitha, N. Pai, Sucheta Kolekar, Vasudeva Pai, Balasubramani, R. (2022), "Use of Machine Learning and Random OverSampling in Stroke Prediction", *International Conference on Artificial Intelligence and Data Engineering (AIDE)*, Karkala, India, P. 331–337. DOI: 10.1109/AIDE57180.2022.10060313
- Blagus, R., Lusa, L. (2012), "Evaluation of SMOTE for High-Dimensional Class-Imbalanced Microarray Data", *11th International Conference on Machine Learning and Applications*, Boca Raton, FL, USA, P. 89–94. DOI: 10.1109/ICMLA.2012.183
- Sáez, J., Luengo, J., Stefanowski, J., Herrera, F. (2015), "SMOTE-IPF: Addressing the noisy and borderline examples problem in imbalanced classification by a re-sampling method with filtering", *Information Sciences*, Vol. 291, P. 184–203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.08.051>
- Mahalakshmi, M., Ramkumar, M. P., Emil Selvan, G., S., R. (2022), "SCADA Intrusion Detection System using Cost Sensitive Machine Learning and SMOTE-SVM", *4th International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICAC3N)*, Greater Noida, India, P. 332–337. DOI: 10.1109/ICAC3N56670.2022.10074251
- Puri, A., Gupta, M. (2020), "Improved Hybrid Bag-Boost Ensemble With K-Means-SMOTE-ENN Technique for Handling Noisy Class Imbalanced Data", *The Computer Journal*, Oxford University Press, Vol. 65, No. 1, P. 124–138. DOI: 10.1093/comjnl/bxab039
- "Titanic–Machine Learning from Disaster", (2022), available at: https://www.kaggle.com/competitions/titanic/data?select=gender_submission.csv (last accessed: 10.05.2023)
- "Salary Prediction Classification", (2022), available at: <https://www.kaggle.com/datasets/ayessa/salary-prediction-classification> (last accessed: 10.05.2023)
- Ni, N., Wu, H., Zhang, L. (2022), "Deformable Alignment and Scale-Adaptive Feature Extraction Network for Continuous-Scale Satellite Video Super-Resolution," *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Bordeaux, France, P. 2746–2750. DOI: 10.1109/ICIP46576.2022.9897998
- Yu, L., Zhou, R., Chen, R., Lai, K. K. (2020), "Missing data preprocessing in credit classification: One-hot encoding or imputation?" *Emerging Markets Finance and Trade*, Vol. 58, No. 2, P. 472–482. DOI: 10.1080/1540496X.2020.1825935
- Dahouda, M. K., Joe, I. (2021), "A Deep-Learned Embedding Technique for Categorical Features Encoding", *IEEE Access*, Vol. 9, P. 114381–114391. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3104357

Відомості про авторів / About the Authors

Тесленко Денис Максимович – Харківський національний університет радіоелектроніки, магістр зі спеціальності "Інженерія програмного забезпечення", Харків, Україна; e-mail: denys.teslenko@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6289-1633>

Сорокіна Анна Сергіївна – Харківський національний університет радіоелектроніки, магістр зі спеціальності "Інженерія програмного забезпечення", Харків, Україна; e-mail: anna.sorokina@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-7380-5223>

Ховрат Артем Вячеславович – Харківський національний університет радіоелектроніки, магістр зі спеціальності "Інженерія програмного забезпечення", Харків, Україна; e-mail: artem.khovrat@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1753-8929>

Гулієв Нурал Бахадур огли – Харківський національний університет радіоелектроніки, магістр зі спеціальності "Інженерія програмного забезпечення", Харків, Україна; e-mail: nural.huliyev@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2123-0377>

Кирій Валентина Василівна – кандидат економічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри економічної кібернетики та управління економічною безпекою, доцент кафедри програмної інженерії (за сумісництвом), Харків, Україна; e-mail: valentya.kyriy@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2537-264X>

Teslenko Denys – Kharkiv National University of Radio Electronics, M. Sc. in Software Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Sorokina Anna – Kharkiv National University of Radio Electronics, M. Sc. in Software Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Khovrat Artem – Kharkiv National University of Radio Electronics, M. Sc. in Software Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Huliyev Nural – Kharkiv National University of Radio Electronics, M. Sc. in Software Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Kyriy Valentyna – PhD (Economic Sciences), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor at the Department of Economic Cybernetics and Management of Economic Security Department, Associate Professor at the Department of Software Engineering (part time), Kharkiv, Ukraine.

ПОРІВНЯННЯ АЛГОРИТМІВ ОВЕРСЕМПЛІНГУ НАБОРІВ ДАНИХ ТА ЇХ ЗАСТОСОВНОСТІ ДЛЯ ПРОБЛЕМИ КАТЕГОРИЗАЦІЇ

Предметом дослідження є питання класифікації в машинному навчанні за наявності незбалансованості класів у наборах даних. **Мета роботи** – аналіз наявних рішень і алгоритмів розв'язання проблеми незбалансованості в наборах даних різних типів і різних галузей та експериментальне порівняння алгоритмів. У статті виконуються такі **завдання**: аналіз підходів до вирішення проблеми – методи попереднього оброблення, методи навчання, гібридні методи й алгоритмічні підходи; визначення та опис алгоритмів оверсемплінгу, що найчастіше використовуються для балансування наборів даних; вибір алгоритмів класифікації, які будуть слугувати інструментом установаження якості балансування, перевіряючи застосовність отриманих після оверсемплінгу наборів даних; визначення метрик оцінки якості класифікації для порівняння; проведення експериментів за запропонованою методикою для виокремлення оптимальних і неоптимальних алгоритмів. Для наочності розглядалися набори даних із різним ступенем незбалансованості (кількість екземплярів класу меншості дорівнювала 15, 30, 45 та 60% від кількості зразків класу більшості). Використовуються такі **методи**: аналітичний та індуктивний – з метою визначення необхідного набору експериментів і побудови гіпотез щодо їх результатів; експериментальний та графічний – для наочної порівняльної характеристики обраних алгоритмів. Здобуто такі **результати**: за допомогою метрик якості досліджено всі алгоритми на двох різних датасетах – пасажирів "Титаніку" та з виявлення шахрайських транзакцій у банківських рахунках; доведено найкращу застосовність алгоритмів SMOTE та SVM SMOTE і виявлено найгірші показники у *Borderline-SMOTE* та *k-means-SMOTE*; описано результати кожного з алгоритмів і потенціал їх використання. **Висновки**. Застосування аналітичного та експериментального методу надало вичерпну порівняльну характеристику алгоритмів балансування. Доведено перевагу алгоритмів оверсемплінгу над алгоритмами андерсемплінгу. Вони порівнювалися за допомогою різних алгоритмів класифікації. Результати подано в графіках і таблицях, а також продемонстровано з допомогою теплових карт. Сформульовано висновки, що можуть бути використані у виборі оптимального алгоритму балансування у сфері машинного навчання.

Ключові слова: категоризація; машинне навчання; методи балансування; методи генерації даних; набір даних; незбалансовані набори даних.

Бібліографічні опису / Bibliographic descriptions

Тесленко Д. М., Сорокіна А. С., Ховрат А. В., Гулієв Н. Б. огли, Кирій В. В. Порівняння алгоритмів оверсемплінгу наборів даних та їх застосовності для проблеми категоризації. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 2 (24). С. 161–171. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.161>

Teslenko, D., Sorokina, A., Khovrat, A., Huliyev, N., Kyriy, V. (2023), "Comparison of dataset oversampling algorithms and their applicability to the categorization problem", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (24), P. 161–171. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.161>

V. KHOLIEV, O. BARKOVSKA

COMPARATIVE ANALYSIS OF NEURAL NETWORK MODELS FOR THE PROBLEM OF SPEAKER RECOGNITION

The **subject matter** of the article are the neural network models designed or adapted for the problem of voice analysis in the context of the speaker identification and verification tasks. The **goal** of this work is to perform a comparative analysis of relevant neural network models in order to determine the model(s) that best meet the chosen formulated criteria, – model type, programming language of model's implementation, parallelizing potential, binary or multiclass, accuracy and computing complexity. Some of these criteria were chosen because of universal importance, regardless of particular application, such as accuracy and computational complexity. Others were chosen due to the architecture and challenges of the scientific communication system mentioned in the work that performs tasks of the speaker identification and verification. The **relevance** of the paper lies in the prevalence of audio as a communication medium, which results in a wide range of practical applications of audio intelligence in various fields of human activity (business, law, military), as well as in the necessity of enabling and encouraging efficient environment for inward-facing audio-based scientific communication among young scientists in order for them to accelerate their research and to acquire scientific communication skills. To achieve the goal, the following **tasks** were solved: criteria for models to be judged upon were formulated based on the needs and challenges of the proposed model; the models, designed for the problems of speaker identification and verification, according to formulated criteria were reviewed with the **results** compiled into a comprehensive table; optimal models were determined in accordance with the formulated criteria. The following neural network based **models** have been reviewed: SincNet, VGGVox, Jasper, TitaNet, SpeakerNet, ECAPA_TDNN. **Conclusions.** For the future research and practical solution of the problem of speaker authentication it will be reasonable to use a convolutional neural network implemented in the Python programming language, as it offers a wide variety of development tools and libraries to utilize.

Keywords: comparative analysis; neural network; intellectual models; model; machine learning; speaker identification; speaker recognition.

Introduction

Despite the rapid spread of the Internet at the beginning of the 21st century and the predominantly textual nature of the information that circulated on it at the beginning of its development, a significant part of the information generated, transmitted, and consumed by humanity remained audiovisual in nature. This is due not only to the limitations of the Internet technology at the time, but also to the biological characteristics of humans as a species, since most of the information we received from the environment is visual and sound information.

Over time, this trend has not only persisted, but also deepened with the development of technologies for generating, transmitting, and storing information. In turn, information processing and analysis technologies have developed and continue to develop still. The degree of decision-making automation continues to grow with the use of deep learning technologies and statistical models.

Recognition and processing of signals such as image, video, audio, and text are highly relevant areas of research that share the need to process large amounts of data, often followed by the application of intelligent analysis techniques [1–3].

As mentioned above, audio information in particular plays one of the most widespread and important roles as it is primarily used in communication and information sharing in all spheres of life, including scientific communication, more specifically inward-facing communication [4–5]. Scientific conferences, symposiums, forums etc. are held predominantly in the format of audio reports or discussions, accompanied by visual material, usually presentation. However, the accompanying visual material is largely optional, and members' presentations are often designed to be listened to with all the necessary information included in the report.

The tasks associated with processing and analyzing audio information include the following:

- voice cloning [6];
- speaker (voice) recognition [7];
- speaker emotion recognition [8].
- speech analytics (search for keywords in a dialog, call assessment, smart assistant, speech annotation, subtitling, speech recognition, transcription of lectures and meetings, etc.)
- etc.

Reviewing the popular current tasks, two similar tasks can be seen – speaker recognition and speech recognition. The difference lies in the fact that during speech recognition, the stage of transcription of speech into text is important, while speaker recognition focuses on analyzing the unique characteristics of speech due to human anatomy. Both technologies first appeared about 60 years ago but became available and effective only with the development of machine learning and the growth of computing power and cloud technologies.

With this information in mind, it becomes clear that enabling and encouraging efficient environment for inward-facing audio-based scientific communication among young scientists is important for them to accelerate research and acquiring scientific communication skills.

Analysis of last achievements and publications

For the matter of scientific communication, there doesn't exist a platform that combines the functionality of paper sharing database as well as a communication environment where two aspects are integrated into each other. With the abundance of online communication solutions, the task of audio communication has been relegated to various external products (e.g. Zoom, Google Meet etc.). This approach, however, is heavily catered towards the experienced researchers who possess the skills and know-how to navigate the vast network

of diverse scientific communities and events that offer an opportunity to communicate via publication, presentation and discussion of their work and finding. Meanwhile, young scientists without aforementioned assets are rendered to work in the environment where they are told that they must 'publish or perish', and training in efficient communication often relies on a baptism of fire [4].

Such an International System of Knowledge Exchange of young scientists (ISKE) is proposed in [9]. As shown on figure 1, the system operates in several modes (data collection and processing mode, access mode) and consists of modules that perform different functions, one of which is a subsystem of social rooms for young scientists grouped by another module by scientific interests and research areas with the possibility of holding conferences. These conferences involve transcription with speaker division and subsequent annotation. This subsystem is also used to verify users when they log in, i.e. as an additional layer of authentication.

System analyses members' papers and qualification works in order to group them by areas of research and interests using methods for determining vectorized text proximity. This enables organization of a community of people with certain scientific interests that in turn encourages their further communication with their peers and potential integration into international research projects.

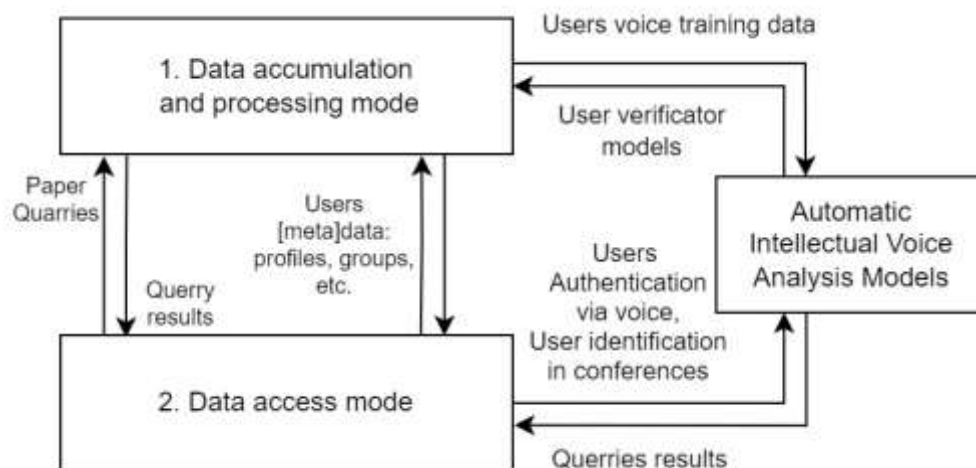


Fig. 1. The system of knowledge exchange of young scientists

Both speaker verification and speaker identification belong to a set of problems known as voice recognition. There are different techniques that attempt to solve this set of problems that can be broadly divided into automatic and manual (Fig. 2). The latter,

including for example stenography, – a process of writing in an abbreviated symbolic writing method, called shorthand, – were used before the widespread of information technologies, especially recent automatic techniques, which can be divided into

neural network based and non-neural network based (for example, Support vector machines and Random forest).

The paper attempts to conduct a comparative analysis of automatic neural network based techniques, that manifest in various models.

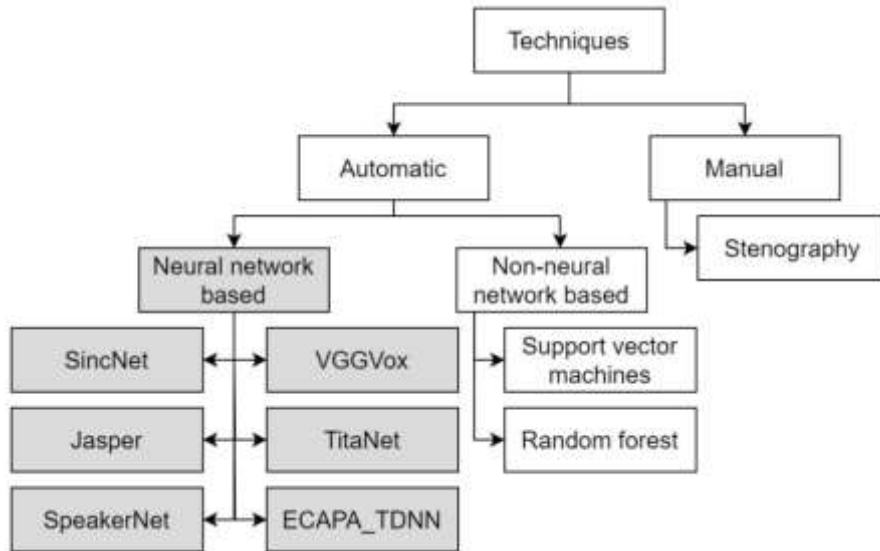


Fig. 2. Classification of voice recognition techniques

The aim of the work is to perform the comparative analysis of neural network models in the context of speaker identification and verification problem according to selected criteria. To achieve this goal, the following tasks are to be accomplished:

- to formulate criteria for models to be judged upon;
- to review the models, designed for the problems of speaker identification and verification, according to formulated criteria;
- to determine corresponding model(s) in accordance with the formulated criteria of the needed to be solved task.

Therefore, the task of comparative analysis of neural network models in the context of speaker identification and verification problem is a relevant task, due to importance of establishing an efficient and encouraging environment for inwards-facing scientific communication for young scientist.

Further development includes adapting the aforementioned models to the task of speech separation with the consideration of their corresponding results, that will be achieved in the summary table (Table 1).

Materials and methods

Among the tasks that the system presented in [6] needs to perform utilizing its modules, such as text

vectorization and clustering based on topic proximity, automatic annotation of papers and held conferences, data security, etc. this paper puts focuses on the tasks of speaker recognition and identification. To solve these tasks neural network based techniques should be utilized, that best suit certain criteria. Such criteria are necessary to work out so that they can correspond to the SIMD execution model due to the system's features and challenges related to ensuring the efficient operation of its modules.

These requirements can be satisfied by meeting the following criteria:

- model type (CNN, RNN, etc.) or architecture it's based on. The type of the model often informs us about broad and general advantages, drawbacks as well as typical applications of the model;
- programming language of model's implementation. Self-explanatory;
- parallelizing potential. Due to the proposed models' other tasks' needs as well as general benefits of parallel computation, this criterion goes hand in hand with the previous one, because of varying availability of development tools across different programming languages;
- whether the model is binary or multiclass as it will affect it's use cases within the communication system;
- accuracy. Self-explanatory;
- computing complexity. Not only the system consists of many modules each with their own task that

require the computation capacity of the hardware that the system will be deployed to which limits the, but the tasks of speaker recognition are time sensitive, which greatly limits

Below we analyze the neural network models according to the proposed criteria.

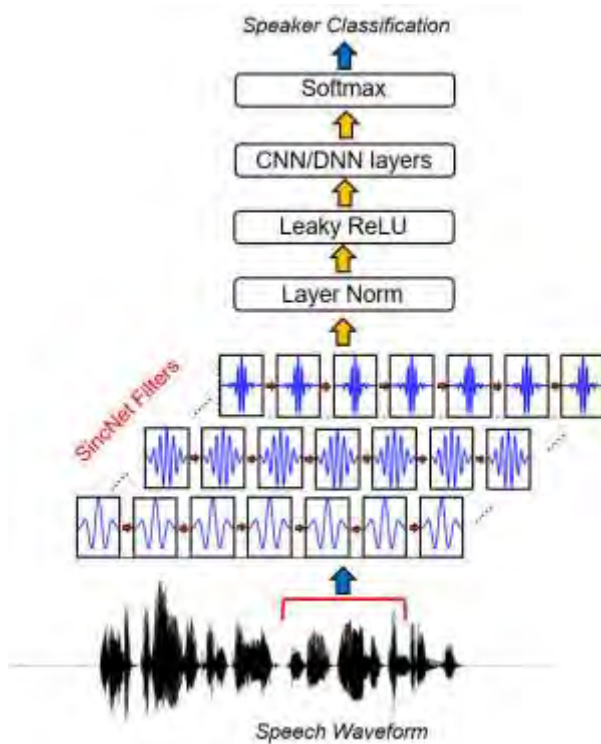


Fig. 3. SincNet model architecture [10, p. 2]

SincNet

The SincNet model is a model derived from Convolutional neural network (CNN). It is based on parametrized sinc functions, which implement band-pass filters. In contrast to standard CNNs, that learn all elements of each filter, only low and high cutoff frequencies are directly learned from data with such method. This offers a way to derive a customized filter bank specifically tuned for the desired application [10]. The architecture of the model is presented in figure 3.

VGGVox

The VGGVox model is a deep CNN based neural speaker embedding system, trained to map voice spectrograms to a compact Euclidean space where distances directly correspond to a measure of speaker similarity. Once such a space has been produced, other tasks such as speaker verification, clustering and diarization can be straightforwardly implemented

using standard techniques, with embeddings proposed in the paper as features [11–12].

TitaNet

The TitaNet model is based on the ContextNet architecture for extracting speaker representations [13]. It functions by employing 1D depth-wise separable convolutions with Squeeze-and-Excitation (SE) layers with global context followed by channel attention-based statistics pooling layer to map variable-length utterances to a fixed-length embedding (tvector). TitaNet is a scalable architecture designed primarily for speaker verification and diarization tasks. The structure of the model is presented in figure 4.

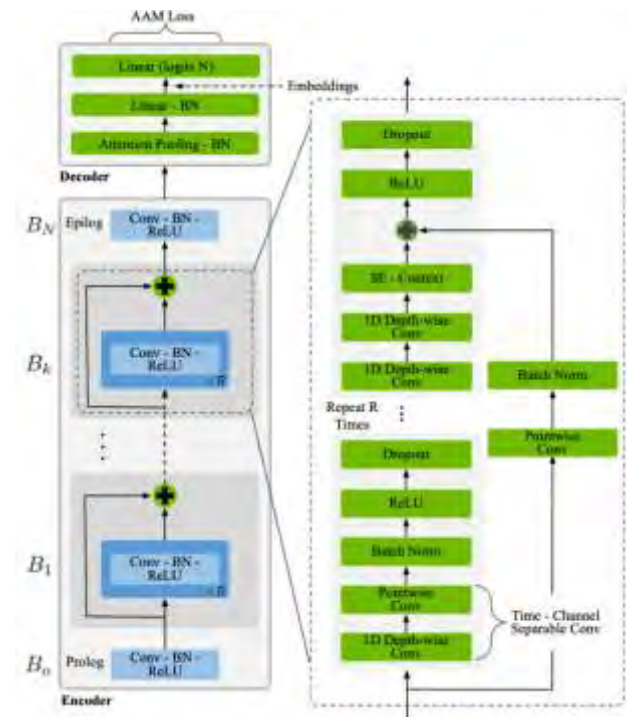


Fig. 4. TitaNet model structure [13, p. 2]

ECAPA_TDNN

The ECAPA-TDNN model is comprised of an encoder of time dilation layers that are based on Emphasized Channel Attention, Propagation, and Aggregation. It employs a channel and context dependent attention mechanism, Multi-layer Feature Aggregation (MFA), as well as Squeeze-Excitation (SE) and residual blocks [15]. Block diagram of the ECAPA-TDNN model is shown in figure 5.

Jasper

Jasper is an End-to-End Convolutional Neural Acoustic Model. It consists of several jasper blocks

with 1 pre and 3 post conv layers. A Jasper BxR model has B blocks, each with R subblocks. Each sub-block applies the following operations: a 1Dconv, batch norm, ReLU, and dropout. All sub-blocks in a block have the same number of output channels. Each block input is connected directly into the last subblock via a residual connection. The residual connection is first projected through a 1x1 convolution to account

for different numbers of input and output channels, then through a batch norm layer. The output of this batch norm layer is added to the output of the batch norm layer in the last sub-block. The result of this sum is passed through the activation function and dropout to produce the output of the current block [16]. The model architecture is shown in figure 6.

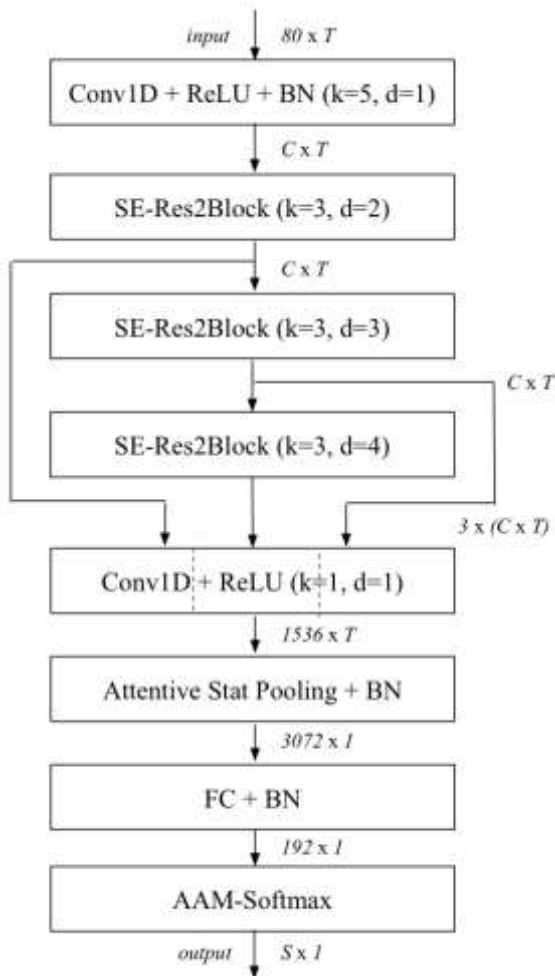


Fig. 5. Block diagram of the ECAPA-TDNN model [15, p. 3561]

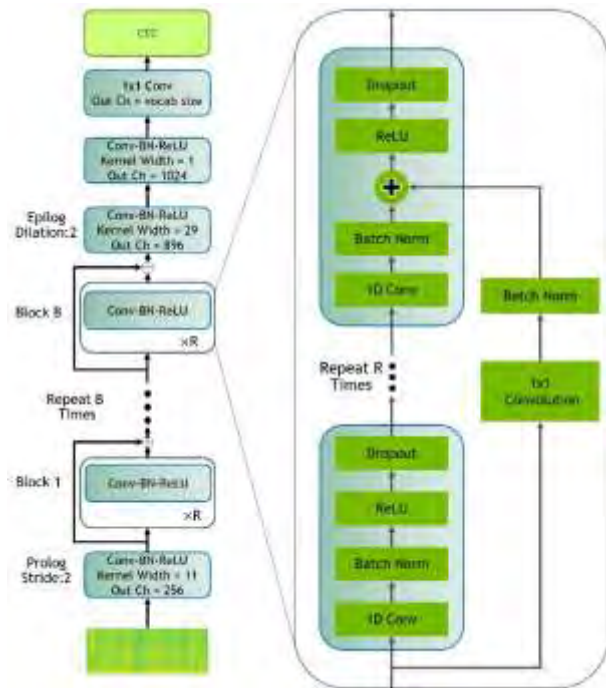


Fig. 6. Jasper model architecture [16, p. 72]

The results of the analysis are summarized in Table 1.

Table 1. Results of comparative analysis against selected criteria

Model name	Programming Language	Model Type	Binary or multiclass	Parallelization potential	Accuracy (Error rate)	Computational complexity
SincNet	Python	CNN	Both	Medium	0.32–0.96	Low
VGGVox	Python	ResNet	Multiclass	Medium	3.93–7.35	Low
Jasper	Python	CNN	Both	High	2.98–3.46	Medium to High
TitaNet	Python	CNN	Both	High	0.68–2.97	Medium to High
SpeakerNet	Python	CNN	Both	High	1.22–2.29	Medium
ECAPA_TDNN	Python	TDNN	Multiclass	High	2.64–3.66	Medium

Conclusion

In this paper, the relevance of the intelligent audio signal analysis problem was demonstrated, which manifests itself in tasks such as speech recognition and speaker recognition due to the widespread use of audio as a communication medium and in a wide range of practical applications in various fields of human activity.

The following criteria were proposed to evaluate existing neural network models for solving these tasks: the type of model or architecture on which it is based, the programming language of the model implementation, the parallelization potential, whether the model is binary or multiclass, accuracy, and computational complexity. These criteria were chosen due to the architecture and challenges of the scientific communication system mentioned in the work. It performs tasks of the speaker identification and verification.

Based on goal of the paper (to determine the model(s) to utilize in the scientific communication platform for the purpose of solving the problem of speaker recognition) and the obtained results, shown in Table 1, a conclusion can be made that for future research and practical solution of the problem it will be reasonable to use the SuncNet or convolutional neural network based on it implemented in the Python programming language, as it offers a wide variety of development tools and libraries to utilize, including CUDA architecture which enables efficient parallelization. This choice is motivated by its low computational complexity, potential for parallelism, which is moderate, and an accuracy metric that outperforms the second most accurate model analyzed (TitaNet) by at least 0.3%.

Further development includes adapting the reviewed models to the task of speech separation to be used in one of system's modules targeted at conferences with the consideration of the obtained results.

References

1. Barkovska, O. (2022), "Research into speech-to-text transformation module in the proposed model of a speaker's automatic speech annotation", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (22), P. 5–13. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSS.2022.22.005>
2. Yashina, E., Artiukh, R., Pan, N., Zelensky, A. (2019), "Information technology for recognition of road signs using a neural network", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (8), P. 130–141. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.8.130>
3. Kholiev, V., Barkovska, O. (2023), "Analysis of the of training and test data distribution for audio series classification", *Information and control systems at railway transport*, No. 1, P. 38–43. DOI: <https://doi.org/10.18664/iksz.v28i1.276343>
4. Illingworth, S.; Allen, G. (2020), "Introduction", *Effective science communication: a practical guide to surviving as a scientist* (2nd ed.), Bristol, UK; Philadelphia: IOP Publishing, P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1088/978-0-7503-2520-2ch1>
5. Côté, I., Darling, E. (2018), "Scientists on Twitter: Preaching to the choir or singing from the rooftops?", *FACETS*, 3, P. 682–694. DOI: <https://doi.org/10.1139/facets-2018-0002>
6. Klin, B., Podpora, M., Beniak, R., Gardecki, A., Rut, J. (2023), "Smart Beamforming in Verbal Human-machine Interaction for Humanoid Robots", *IEEE Robotics and Automation Letters*, P. 4689–4696. DOI: 10.1109/LRA.2023.3288381
7. Jin, R., Ablimit, M., Hamdulla, A. (2023), "Speaker Verification based on Single Channel Speech Separation", *IEEE Access*, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/iel7/6287639/6514899/10156847.pdf>
8. Froiz-Míguez, I., Fraga-Lamas, P., Fernández-Caramés, T. M. (2023), "Design, Implementation and Practical Evaluation of a Voice Recognition Based IoT Home Automation System for Low-Resource Languages and Resource-Constrained Edge IoT Devices: a System for Galician and Mobile Opportunistic Scenarios", *IEEE Access*, available at: <https://www.researchgate.net/profile/Tiago-Fernandez-Carames>
9. Tesema, F. B., Gu, J., Song, W., Wu, H., Zhu, S., Lin, Z. (2023), "Efficient Audiovisual Fusion for Active Speaker Detection", *IEEE Access*, Vol. 11, P. 45140–45153. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3267668
10. Hu, Z., LingHu, K., Liao, C., Yu, H. (2023), "Speech Emotion Recognition Based on Attention MCNN Combined With Gender Information", *IEEE Access*, Vol. 11, P. 50285–50294. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3278106
11. Barkovska, O., Kholiev, V., Pyvovarova, D., Ivaschenko, G., Rosinskiy, D. (2021), "International system of knowledge exchange for young scientists", *Advanced Information Systems*, No. 5 (1), P. 69–74. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.1.09>
12. Ravanelli, M., Bengio, Y. (2018), "Speaker Recognition from Raw Waveform with SincNet", *2018 IEEE Spoken Language Technology Workshop (SLT)*, Athens, Greece, P. 1021–1028. DOI: <https://doi.org/10.1109/SLT.2018.8639585>
13. Nagrani, A., Chung, J. S., Zisserman, A. (2017), "VoxCeleb: A Large-Scale Speaker Identification Dataset", *Proc. Interspeech 2017*, P. 2616–2620. DOI: <https://doi.org/10.21437/Interspeech.2017-950>
14. Chung, J. S., Nagrani, A., Zisserman, A. (2018), "VoxCeleb2: Deep Speaker Recognition", *Proc. Interspeech 2018*, P. 1086–1090. DOI: <https://doi.org/10.21437/Interspeech.2018-1929>
15. Kologuri, N. R., Park, T., Ginsburg, B. (2021), "TitaNet: Neural Model for Speaker Representation with 1D Depth-Wise Separable Convolutions and Global Context", *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, P. 8102–8106. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.04410>

16. Kologuri, N. R., Li, J., Lavrukhin, V., Ginsburg, B. (2020), "SpeakerNet: 1D Depth-wise Separable Convolutional Network for Text-Independent Speaker Recognition and Verification", *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.12653>
17. Dawalatabad, N., Ravanelli, M., Grondin, F., Thienpondt, J., Desplanques, B., Na, H. (2021), "ECAPA-TDNN Embeddings for Speaker Diarization", *Proc. Interspeech, 2021*, P. 3560–3564. DOI: <https://doi.org/10.21437/interspeech.2021-941>
18. Li, J., Lavrukhin, V., Ginsburg, B., Leary, R., Kuchaiev, O., Cohen, J., Nguyen, H., Gadde, R. (2019), "Jasper: An End-to-End Convolutional Neural Acoustic Model", *Electrical Engineering and Systems Science*, P. 71–75. DOI: <https://doi.org/10.21437/Interspeech.2019-1819>

Received 16.06.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Холєв Владислав Олександрович – Харківський національний університет радіоелектроніки, асистент кафедри електронних обчислювальних машин, Харків, Україна; e-mail: vladyslav.kholiev@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9148-1561>

Барковська Оlesia Юрївна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри електронних обчислювальних машин, Харків, Україна; e-mail: olesia.barkovska@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7496-4353>

Kholiev Vladyslav – Kharkiv National University of Radio Electronics, postgraduate at the Department of Electronic Computers, Kharkiv, Ukraine.

Barkovska Olesia – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor at the Department of Electronic Computers, Kharkiv, Ukraine.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ НЕЙРОМЕРЕЖНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАВДАНЬ РОЗПІЗНАВАННЯ СПІКЕРА

Предметом дослідження є нейромережні моделі, розроблені або адаптовані для розв'язання проблеми аналізу голосу в контексті завдань ідентифікації та верифікації спікера. **Метою роботи** є проведення порівняльного аналізу відповідних нейромережних моделей для визначення однієї (або кількох), що якнайкраще відповідає таким обраним критеріям: тип моделі, мова програмування реалізації моделі, потенціал розпаралелювання, чи є модель бінарна, чи мультикласова, точність та обчислювальна складність. Деякі з цих критеріїв обрані, оскільки є універсально важливими, незалежними від того чи іншого завдання, наприклад точність і обчислювальна складність. Інші критерії обрані у зв'язку з архітектурою та недоліками системи наукової комунікації, що виконує завдання ідентифікації та перевірки спікера. **Актуальність** роботи полягає в поширенні аудіо як комунікативного засобу, зокрема йдеться про практичне застосування його інтелектуального аналізу в різних сферах людської діяльності (бізнес, право, військова справа). Крім того, постає питання про необхідність створення ефективного середовища внутрішньої наукової комунікації на основі аудіо серед молодих учених, що дасть їм змогу прискорити свої дослідження й набути навичок наукового спілкування. Для досягнення мети в роботі розв'язані такі **завдання**: сформульовано критерії для оцінюваних моделей з огляду на конкретні потреби й завдання; за певними критеріями досліджено моделі, розроблені для завдань ідентифікації та верифікації спікера. **Результати**: розглянуто моделі *SincNet*, *VGGVox*, *Jasper*, *TitaNet*, *SpeakerNet*, *ECAPA_TDNN*; результати дослідження нейромережних моделей зведено в загальну таблицю; визначено оптимальні моделі відповідно до сформульованих критеріїв. **Висновки**: для майбутніх досліджень і практичного розв'язання проблеми автентифікації спікера доцільно використовувати згорткову нейронну мережу, реалізовану мовою програмування *Python*, оскільки вона пропонує широкий вибір інструментів розроблення та бібліотек.

Ключові слова: порівняльний аналіз; нейронна мережа; інтелектуальні моделі; модель; машинне навчання; ідентифікація спікера; розпізнавання спікера.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Холєв В. О., Барковська О. Ю. Порівняльний аналіз нейромережних моделей для розв'язання завдань розпізнавання спікера. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 2 (24). С. 172–178. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.172>

Kholiev, V., Barkovska, O. (2023), "Comparative analysis of neural network models for the problem of speaker recognition", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (24), P. 172–178. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.172>

УДК 005.8:629.434:656.615

DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.179>

А. БОНДАР, О. ЛАПКІН

МЕТОДИ Й МОДЕЛІ ФОРМУВАННЯ ПОРТФЕЛЮ ПРОЄКТІВ РОЗВИТКУ МІСЬКОГО ТРАНСПОРТУ НА БАЗІ КОНЦЕПЦІЇ СМАРТ ПОРТ-СІТІ

Предметом розгляду в статті є методи й моделі формування портфелю проєктів розвитку транспортної інфраструктури портового міста. **Мета роботи** – дослідження особливостей проєктів розвитку транспортної інфраструктури міста за участю позавуличного транспорту, зокрема його морського складника, на основі сучасної концепції Смарт Порт-Сіті, яка враховує гармонійне цілевизначення напрямів розвитку міста й порту. У роботі розв’язуються такі **завдання**: аналіз стану та проблем транспортної інфраструктури портового міста; визначення множини проєктів на базі концепцій Смарт Сіті та Смарт Порт; цілевизначення та вплив стейкхолдерів на ініціювання проєктів позавуличних видів транспорту; моделювання складу портфелю проєктів Смарт Порт-Сіті та їх рейтингової оцінки. Під час дослідження застосовуються такі **методи**: порівняльний аналіз, синтез, теорія множин, теорія управління проєктами, рейтингове оцінювання. **Здобуті результати**. Визначено, що Смарт Сіті є концепцією, що сприяє інноваційним рішенням з управління всіма видами транспорту на рівні окремого міста. Систематизовано цілевизначення, що відображає участь органів державного управління та суб’єктів комерційної діяльності міста в ініціюванні проєктів за напрямом розширення сфери використання позавуличних видів транспорту. Для міст, у яких особливе значення має робота порту, чимало проєктів оснований на концепції Смарт Порт. Поєднання цих двох концептуальних засад набуло форми Смарт Порт-Сіті, що містить широке коло ініціатив проєктів з отримання нових перспективних орієнтирів розвитку міст і портів. Установлено процедуру відбору проєктів за такими ініціативами до портфелю та матричну форму рейтингової оцінки проєктів з боку як міста, так і порту. **Висновки**. Запропонований підхід до відбору проєктів, що впливають із системного цілевизначення в розв’язанні транспортних проблем міста й функціональних галузей порту. Розроблено формалізовану процедуру відбору проєктів до портфелю з позицій Смарт Порт-Сіті, що дає змогу, по-перше, ідентифікувати проєкти, які відповідають спільним цілям міста й порту; по-друге, виконати рейтингове оцінювання проєктів відповідно для міського та портового складника; по-третє, за встановленою межею визначити проєкти з найбільшим пріоритетом.

Ключові слова: проєкт; портфель; міський транспорт; позавуличний транспорт; Смарт Порт-Сіті.

Вступ

На сьогодні понад половина населення Землі вже проживає в міських агломераціях, а до 2030 р. цей показник може зрости до 2/3 світового населення. Міста набувають усе більшого значення, а розвиток транспортної інфраструктури є одним із найактуальніших питань міського життя. В Одеській області лівову частину пасажирських перевезень виконує міський громадський транспорт, а всі інші види перевезень, зокрема приміські, міжміські та внутрішньообласні, є незначними.

До початку воєнного стану в нашій країні проводилось оновлення парків громадського транспорту в різних містах. Одеса також не стала винятком. 25 листопада 2020 р. урядом було ухвалено використання позики в розмірі 200 млн євро від Європейського інвестиційного банку (ЄІБ) для фінансування проєкту "Міський громадський транспорт України II". Позика мала бути витрачена на оновлення парків громадського транспорту в українських містах, насамперед на закупівлю електричного громадського транспорту (трамваїв,

тролейбусів, електробусів, вагонів метро), а також на будівництво й оновлення мережі трамвайних і тролейбусних ліній та заміну тягових підстанцій. Проєкт "Міський громадський транспорт України II" мав впливати на безпеку дорожнього руху, зменшуючи його та сприяючи переходу з приватного транспорту на громадський.

Серед визначених 18 міст-учасників цього проєкту Одеса – єдине місто з можливістю залучення морського транспорту до відповідного підпроєкту, а напрями розвитку інфраструктури Одеського порту окремою позицією передбачають розвиток пасажирського комплексу. Але проєкт за участю ЄІБ, на жаль, не враховує особливостей територіального розташування міста, його традицій і накопиченого десятиліттями досвіду роботи в морських міських і приміських сполученнях.

Постановка проблеми

Надійне та результативне функціонування міського громадського транспорту є ключовим фактором соціально-політичної та економічної

стабільності в місті. Тому значної уваги потребує збільшення методів, технологій і інструментів управління, спрямованих на розроблення науково обґрунтованих рішень щодо надання якісних транспортних послуг населенню.

Розвиток транспортної інфраструктури регіонів і міст відбувається в системі соціокультурного, фінансово-економічного, інноваційного, правового, аналітичного, методичного напрямів [1]. Транспортні інфраструктурні проекти стосуються водночас усіх цих напрямів, а саме:

- соціокультурного, оскільки забезпечують відповідність державним соціальним нормативам у сфері транспортного обслуговування та зв'язку;
- фінансово-економічного, адже впливають на бюджетне планування для забезпечення державою соціальних стандартів; викликають необхідність прямих державних інвестицій на реалізацію проектів, спрямованих на модернізацію транспортної інфраструктури міст;
- інноваційного, що передбачає запровадження програм підвищення конкурентоспроможності територій, забезпечення державної підтримки інноваційних процесів;
- правового, що містить питання правового регулювання, які стосуються певного регіону;
- аналітичного, оскільки йдеться про забезпечення повноти інформації та комунікативних зв'язків між суб'єктами прийняття рішень і об'єктами державного управління;
- методичного, необхідного для отримання достовірної планової та прогнозової інформації в проектах, що ініціюються, на базі науково-обґрунтованих методів.

Аналіз проблеми й наявних методів

Методологія управління проектами з огляду на особливості сфери транспорту загалом і окремих його видів набула активного застосування та подальшого розвитку в дослідженнях С. Бушуєва, С. Руденка, Т. Ковтун, І. Лапкіної, М. Малаксіано, С. Онищенко та інших учених [2–8]. Увагу до особливостей міських пасажирських перевезень приділено в роботах Ю. Давідіча, І. Чумаченка [9–12] та інших науковців, зокрема в дисертації [13]. Предметну галузь морського транспорту в проектах і портфелях проектів розглянуто в працях [14–18]. Але згадані роботи поза увагою залишають специфіку

проектів морського пасажирського транспорту в міських та приміських сполученнях і будь-яких видів міського позавуличного транспорту взагалі.

Мета статті – дослідити особливості структури портфелю проектів розвитку транспортної інфраструктури міста за участю позавуличного транспорту, зокрема його морського складника, на основі сучасної концепції Смарт Порт Сіті, яка враховує гармонійне цілевизначення напрямів розвитку міста й порту.

Розв'язані завдання

Актуальні проблеми транспортної інфраструктури міста

Розвиток транспортної інфраструктури є одним із найактуальніших питань міського середовища. Відомо, що транспортна мережа є основою, навколо якої відбувається містобудування. В останні десятиліття транспортна інфраструктура м. Одеси розвивалася під впливом багатьох чинників. Необхідно насамперед наголосити на таких: відносна стійкість кількості населення (до 2001 р. – 1001 тис.; 2011 р. – 1009,1 тис.; 2021 р. – 1015,8 тис.; 2022 р. – 1010,5 тис.) [19]; дуже активний розвиток будівництва житла як в самому місті, так і в передмісті; темпи зростання кількості автомобілів на душу населення міста (до 10 % на рік). За інформацією [20], відповідно до індексу дорожнього руху *TomTom*, місто Одеса посіло 7-ме місце в Європі та 18-те у світі, поступившись серед усіх українських міст лише Києву (3-тє місце в Європі та 12-те у світі). За відносно стабільної кількості жителів Одеси спостерігається активне збільшення території, освоєної для житла, зростання середніх відстаней від територій масового нового будівництва до середмістя, кардинальне збільшення забудованих площ у вже розвинених районах центральної частини міста. Разом із змінами в структурі зайнятості населення, яке проживає в новобудовах, перелічені особливості сприяють додатковому збільшенню мобільності населення.

Аналіз одеської транспортної інфраструктури, виконаний у роботах [21, 22], дав змогу систематизувати її проблеми за сімома групами, серед яких необхідно згадати: недостатню транспортну комунікацію між центральною частиною міста та мікрорайонами; відсутність швидкісних магістралей; неналежну розвиненість сполучних

елементів інфраструктури між центрами утворення транспортних потоків; обмежені можливості для руху та паркування автомобілів у центральній частині міста; відсутність розвитку системи позавуличного транспорту тощо. Подальшу увагу в дослідженні приділено саме останньому з перелічених складників, що не втрачає своєї актуальності й нині, та є основою для ініціювання відповідних проєктів.

З огляду на географічне розташування міста, досвід останніх десятиліть ХХ ст. та відкриті можливості для відродження морських прибережних перевезень, логічною пропозицією серед проєктів розвитку системи позавуличного транспорту є відновлення послуг морського прибережного сполучення. Супутнім до збереження та поширення прогулянкової компоненти складником є використання пасажирських суден прибережної зони плавання саме як транспортних засобів для перевезень пасажирів. Розвиненість транспортної системи, зручність і якість міських транспортних сполучень для мешканців і гостей міста визначають важливий напрям відродження економіки міста й регіону загалом.

Проєкти розвитку транспортної інфраструктури на базі концепцій *Smart City* та *Smart Port*

Набуває популярності сучасна концепція *Smart City* (*Smart City*, Розумне місто), яка сприяє активному інноваційному розвитку та інформаційній підтримці кожного окремого міста. Відомо декілька інтерпретацій цієї концепції.

Під поняттям *Smart* розуміється загальний підхід у менеджменті та в управлінні проєктами до постановки цілей та їх планування, який визначає, що цілі мають бути *Specific* (специфічними, тобто відповідати змісту об'єкта), *Measurable* (вимірними), *Achievable* (досяжними), *Relevant* (відповідними) й *Time-bound* (визначеними в часі). *Smart* (*Self-monitoring, Analysis and Reporting Technology*) – це технологія автоматичного контролю, аналізу та звітування в галузі інформаційних технологій. *Smart* – кмітливий, розумний, що наголошує на розвинутому інтелектуальному складнику об'єкта. На наш погляд, нині відбувається поєднання всіх трьох згаданих напрямів щодо зазначеної концепції.

Ідея Розумного міста з'явилась наприкінці минулого століття. На сьогодні список міст, особливо мегаполісів, де ця концепція є основою розроблення власної системи управління та пріоритетних напрямів розвитку, активно поповнюється. До таких міст

належать Сінгапур, Гельсінкі, Цюрих, Окланд, Осло – лідери рейтингу *IMD Business School* у вересні 2020 р. За інформацією *McKinsey*, до 2025 р. внесок таких міст до світового ВВП дорівнюватиме 60%. До 2020 р. індустрія Розумних міст стала активним ринком з 400 млрд дол. і охоплює 600 міст у всьому світі. Із загальної кількості 109 міст у згаданому рейтинговому списку Київ посів 98 місце. В Україні на фінансування програми "Електронна столиця" 2022 р. було передбачено понад 2 млн грн із міського бюджету, а за результатами рейтингового оцінювання щодо втілення інноваційних рішень у міську інфраструктуру в межах *Kyiv Smart City Forum 2020* найбільш "розумним" українським містом із населенням до 100 тис. осіб 2020 р. визнано Мукачєво.

Smart City об'єднує різні функціональні галузі, такі як *Smart energy* (з усіма видами енергозабезпечення, зокрема альтернативні джерела); *Smart transport* (з усіма видами міського та приміського, загальнодоступного й особистого транспорту, відповідними транспортними потоками й транспортною інфраструктурою); *Smart water and gas*; *Smart city center*; *Smart living* (з будівлями житлового, комерційного й промислового призначення). Технічне та технологічне забезпечення містить мережу датчиків сенсорів, відеокамер, мобільних бездротових мереж та алгоритми динамічного аналізу вхідних інформаційних потоків. Отримана інформація призначена для надання детального та всебічного опису міського середовища з метою прийняття рішень щодо вдосконалення та розвитку. У роботі [23] склад функціональних галузей *Smart City* подається в такому вигляді: транспорт і мобільність, природні ресурси та енергія, будівництво й архітектура, якість життя, економічний розвиток, уряд. Зазначимо, що транспортний складник є невід'ємною та значущою частиною функціональної структури *Smart City* в різних її поданнях.

У подальшому дослідженні будемо спиратися на структуру *Smart City* у складі: енергія, транспорт, вода, газ, міське середовище, дім із додаванням підтримки функціональних зв'язків із владою – складником "уряд".

Управління транспортом здійснюється на базі широкого використання інформаційних технологій, IoT (Інтернету речей), зокрема в режимі реального часу, оптимізаційних алгоритмів зменшення відстані та часу переміщення пасажирів і вантажів, використання техніко-експлуатаційних характеристик

транспортних засобів тощо. Усе це відкриває широкі можливості для визначення системи цілей у розв'язанні проблемних завдань щодо підвищення пропускної здатності транспортних артерій, зменшення транспортного напруження на окремих ланках інфраструктури шляхом упровадження альтернативних (зокрема з урахуванням фактора сезонності) маршрутів як для вже наявних видів транспорту, так і в комбінації з новими видами.

Генеральною метою складника "транспорт" необхідно вважати найбільш повне забезпечення мобільності мешканців міста на основі розвинених транспортних сполучень. Серед цілей першого рівня, спрямованих на розв'язання визначених і згаданих вище проблем, зосередимо подальшу увагу на запровадженні перевезень позауличним транспортом, зокрема його комбінованого використання з традиційними видами міського транспорту. Зазначені цілі першого рівня, а також локальні цілі другого рівня показано на рис. 1.

Необхідно звернути увагу на роль стейкхолдерів в ініціюванні проєктів, що відповідають зазначеним цілям. Безумовно, вагома участь у впровадженні та підтримці таких проєктів належить державним органам управління, а саме муніципалітету. Також необхідно наголосити, що ініціатива може йти від суб'єктів комерційної діяльності, особливо зважаючи на те, що подальше оперування створеними об'єктами може виконуватись компаніями, що вже працюють на ринку або будуть створені в межах відповідних проєктів.

Ініційована в порту Гамбург 2012 р. новаторська концепція Розумного порту (Смарт Порт) застосовується в різних портах світу, зокрема Антверпені, Барселоні, Гамбурзі, Лос-Анджелесі, Монреалі, Пусані, Роттердамі, Сінгапурі тощо. У світі існує 33 мегаполіси з населенням понад 10 млн осіб, з яких 25 – портові міста, що обслуговують близько 25% обсягу світових контейнерних перевезень. Однак концепція Розумного порту не обмежується використанням тільки у великих містах і портах, адже вона може успішно застосовуватись і в портах, менших за масштабами.

Смарт Порт вирішує типові завдання, пов'язані з управлінням портовими операціями, такими як контроль судозаходів, використання портового обладнання, пересування вантажів, зокрема небезпечних, територією порту, їх складське зберігання тощо. Загальносвітові тенденції зростання розмірів транспортних і круїзних суден, обсягів перевалки

вантажів та обслуговування пасажирів впливають на виникнення нових завдань, технологічною основою розв'язання яких є IoT. Адже зазначена технологія сприяє покращенню складської логістики, управління запасами, автоматизації процесів навантаження, вивантаження, відправлення та транспортування [24].

У роботі [25] на основі значної кількості проаналізованих джерел наведено склад функціональних галузей Смарт Порту, а саме: Смарт управління суднами, Інтелектуальні транспортні потоки, Смарт інфраструктура, Смарт контейнери, Інтелектуальна інформаційна система. У подальшому дослідженні спираємось на цей перелік з його доповненням складниками – Смарт логістика, Смарт система безпеки та екологічний моніторинг.

Поєднання Смарт Сіті та Смарт Порту сприяло виникненню концепції Смарт Порт-Сіті. Прикладом застосування такої концепції є багато великих і малих сучасних портів-міст [26–28]. Реалізація Смарт Порт-Сіті в муніципальних органах влади та портової адміністрації ґрунтується на збалансованих інтересах, що враховують результати аналізу прозорих інтегрованих даних із двох відповідних джерел – міста й порту. У цьому разі портове місто розглядається як цілісний суб'єкт, що сприяє генерації спільних дій, наприклад, у боротьбі з кліматичними змінами. Основні напрями таких дій спрямовані на зменшення викидів шкідливих речовин в атмосферу, захист довкілля, підвищення здорових умов і якості життя людей. До останнього складника безпосередньо належить забезпечення сталої мобільності населення, а міські та транзитні транспортні засоби в цьому контексті відіграють важливу роль. Наслідки забруднення від викидів шкідливих речовин стають усе більш небезпечними для людей та всієї екосистеми, тому Смарт міське середовище та Смарт система безпеки та екологічного моніторингу мають бути орієнтованими на громадський транспорт і транспортні засоби особистого користування, а також вантажні перевезення регулярного характеру. Така ситуація є особливо небезпечною в містах, де порт розташований неподалік від житлових кварталів, як у м. Одеса.

Метою Розумного міста та порту є не тільки цифрове об'єднання всіх вхідних інформаційних елементів з кожного боку, але й багатоаспектна співпраця між урядовими структурами, бізнес-середовищем та міським населенням.

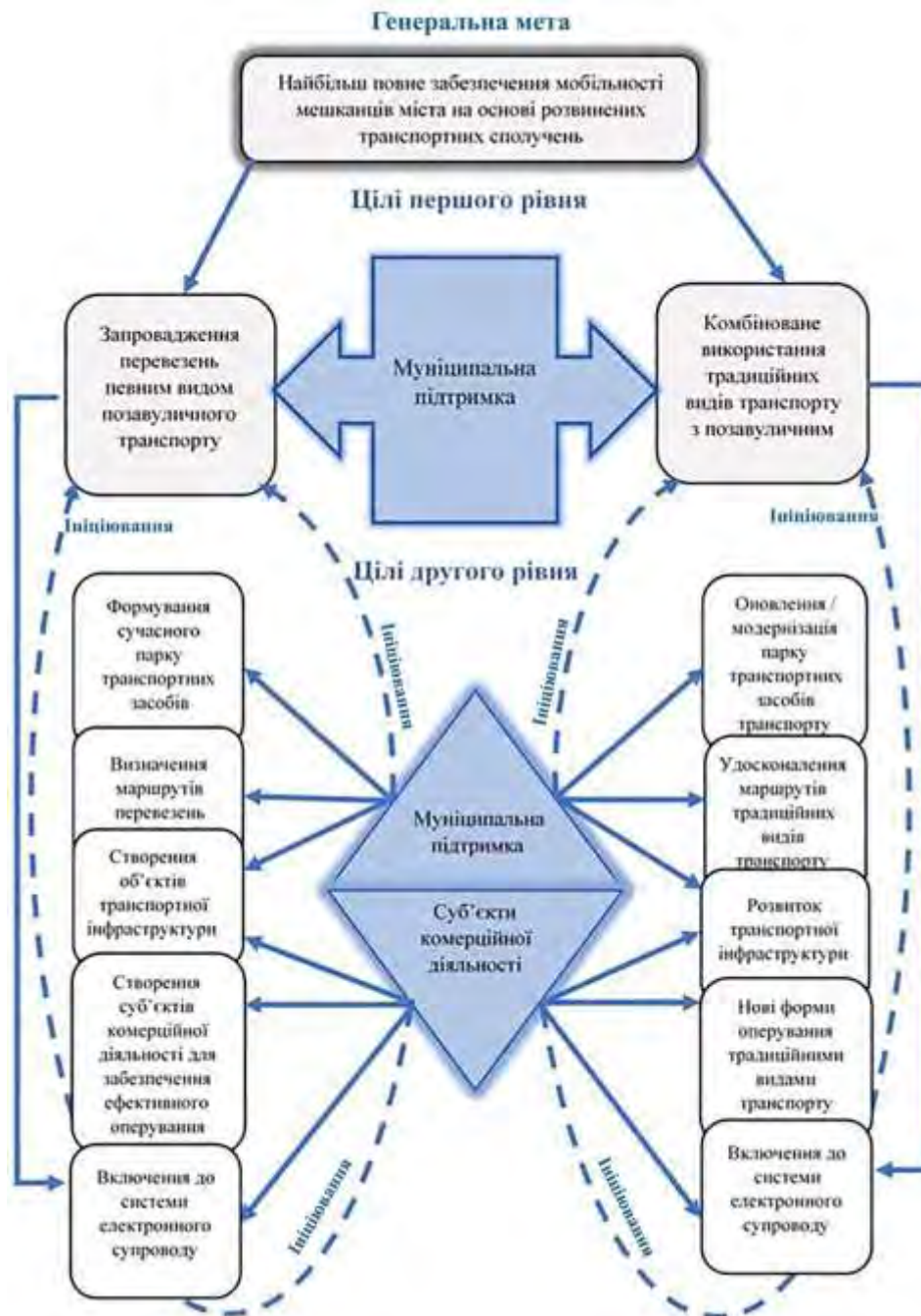


Рис. 1. Цілевизначення та ініціювання проєктів за участю позавуличних видів транспорту

На рівні розроблення макромоделі транспортної інфраструктури міста в безпосередньому взаємозв'язку з розвитком портового виробництва виникає перетин множин проєктів, що належать до відповідних функціональних галузей Смарт Сіті та Смарт Порту. Це відбувається для оптимізації транспортних, пасажиро- та вантажопотоків у міському просторі для забезпечення загальної міської мобільності, а також потреб порту. Планування та координація різних видів транспорту на міському рівні враховують

центри вантажних (порт) та пасажирських (райони міста, порт) потоків; використання традиційних вуличних (трамваї, тролейбуси, автобуси, маршрутні таксі, автомобілі) та альтернативних, зокрема позавуличних, видів транспорту (швидкісний трамвай, канатні дороги, водний міський транспорт, велосипеди, скутери тощо); проєктування дорожньої інфраструктури; використання інформаційних засобів моніторингу тощо. Концепція Смарт Порт-Сіті містить чимало проєктів щодо набуття нових знань, розроблення

технологій, систем, виробництва продуктів та надання послуг. Ініціювання таких проєктів спрямоване на забезпечення перспективних напрямів розвитку міст і портів, раціонального управління, ефективного використання ресурсів, підвищення цінностей міського середовища та досягнення високої результативності в портовій виробничій діяльності. Визначення складу проєктів та їх пріоритетність має відбуватись з урахуванням складників, що належать як до проблем міста, так і порту.

Методика визначення складу портфелю проєктів Смарт Порт-Сіті та їх рейтингової оцінки

Визначимо множину проєктів функціональної галузі "Транспорт" у складі Смарт Сіті як $\{P_{w^m}^{m-m}\}$, де верхній індекс – відношення проєкту p до цільовизначення генеральної мети в розв'язанні транспортних проблем на рівні міста, а нижній – w^m ($w^m = \overline{1, W^m}$) – індекс мети проєкту цієї функціональної галузі, що відповідає першому рівню цільовизначення за логічною послідовністю, поданою на рис. 1.

Серед функціональних галузей Смарт Порту виокремимо Інтелектуальні транспортні потоки та Смарт інфраструктуру. Позначимо множини проєктів кожного складника $\{P_{w^n}^{n-mn}\}$ та $\{P_{w^n}^{n-n-infp}\}$ відповідно. Верхній індекс визначає відношення до верхнього рівня цільовизначення за функціональною галуззю на рівні порту, а нижній – w^n ($w^n = \overline{1, W^n}$) – індекс мети проєкту.

У такий спосіб формується загальна множина проєктів для їх подальшого відбору з позицій концепції Смарт Порт-Сіті. Процедура відбору до портфелю та пошуку рейтингу відібраних проєктів здійснюється за послідовністю, зображеною на рис. 2, та містить процеси, зміст яких викладено далі.

– Визначення цілей міста $w^m = \overline{1, W^m}$ в проєктах функціональної галузі "Транспорт" у складі Смарт Сіті.

– Моделювання множини проєктів міста P^{m-m} у функціональній галузі "Транспорт" Смарт Сіті з визначеними цілями

$$P^{m-m} = \{p : P_{w^m}^{m-m}(p)\}. \quad (1)$$

– Моделювання множини P^m проєктів, де порт є стейкхолдером,

$$P^{m-m} \setminus P^m = \{p : p \in P^{m-m} \wedge p \notin P^m\} \quad (2)$$

окреслює коло проєктів, що надалі не розглядатимуться, оскільки не мають відношення до транспортних потоків за участю Порту. Тобто множина P^m містить лише проєкти за цілями, що визначають безпосереднє ініціювання або вплив на їх реалізацію Порту.

Необхідно зазначити, що для Смарт Сіті розглядається одна функціональна галузь, а саме "Транспорт". Натомість у складі Смарт Порту, як правило, досліджуються декілька функціональних галузей, оскільки сам Порт є об'єктом транспортної інфраструктури, до того ж складного характеру. Отже, впливати на транспортні потоки міста можуть проєкти з декількох функціональних галузей Порту. Наведемо послідовність процесів відбору таких проєктів.

– Визначення цілей w^n ($w^n = \overline{1, W^n}$) проєктів функціональних галузей Смарт Порту. Зазначені функціональні галузі Смарт Порту утворюють декілька відповідних множин проєктів.

– Для кожної з цілей, що розглядаються далі за двома галузями, такі множини подані для Інтелектуальних транспортних потоків –

$$P^{n-mn} = \{p : P_{w^n}^{n-mn}(p)\} \quad (3)$$

і для Смарт інфраструктури –

$$P^{n-infp} = \{p : P_{w^n}^{n-infp}(p)\}. \quad (4)$$

– Моделювання множини проєктів P^n задіяних функціональних галузей Смарт Порту, що відповідають визначеним цілям

$$P^n = \{P^{n-mn}\} \cup \{P^{n-infp}\}. \quad (5)$$

– Моделювання множини проєктів P^{c-n-c} , що відповідають спільним цілям Смарт Сіті та Смарт Порту

$$P^{c-n-c} = P^m \cap P^n = \{p : p \in P^m \wedge p \in P^n\}. \quad (6)$$

З розгляду вилучаються такі проєкти Смарт Сіті –

$$P^m = P^m \setminus P^{c-n-c} = \{p : p \in P^m \wedge p \notin P^{c-n-c}\} \quad (7)$$

та Смарт Порту –

$$P^n = P^n \setminus P^{c-n-c} = \{p : p \in P^n \wedge p \notin P^{c-n-c}\}, \quad (8)$$

а залишаються, відповідно, $\overset{\vee}{P^m}$ та $\overset{\vee}{P^n}$ ($P^m \subset P^{c-n-c}$; $\overset{\vee}{P^n} \subset P^{c-n-c}$). У такий спосіб формується первинний набір проєктів у портфелі Смарт Порт-Сіті. Подальша рейтингова оцінка встановлюється для проєктів із множини P^{c-n-c} .

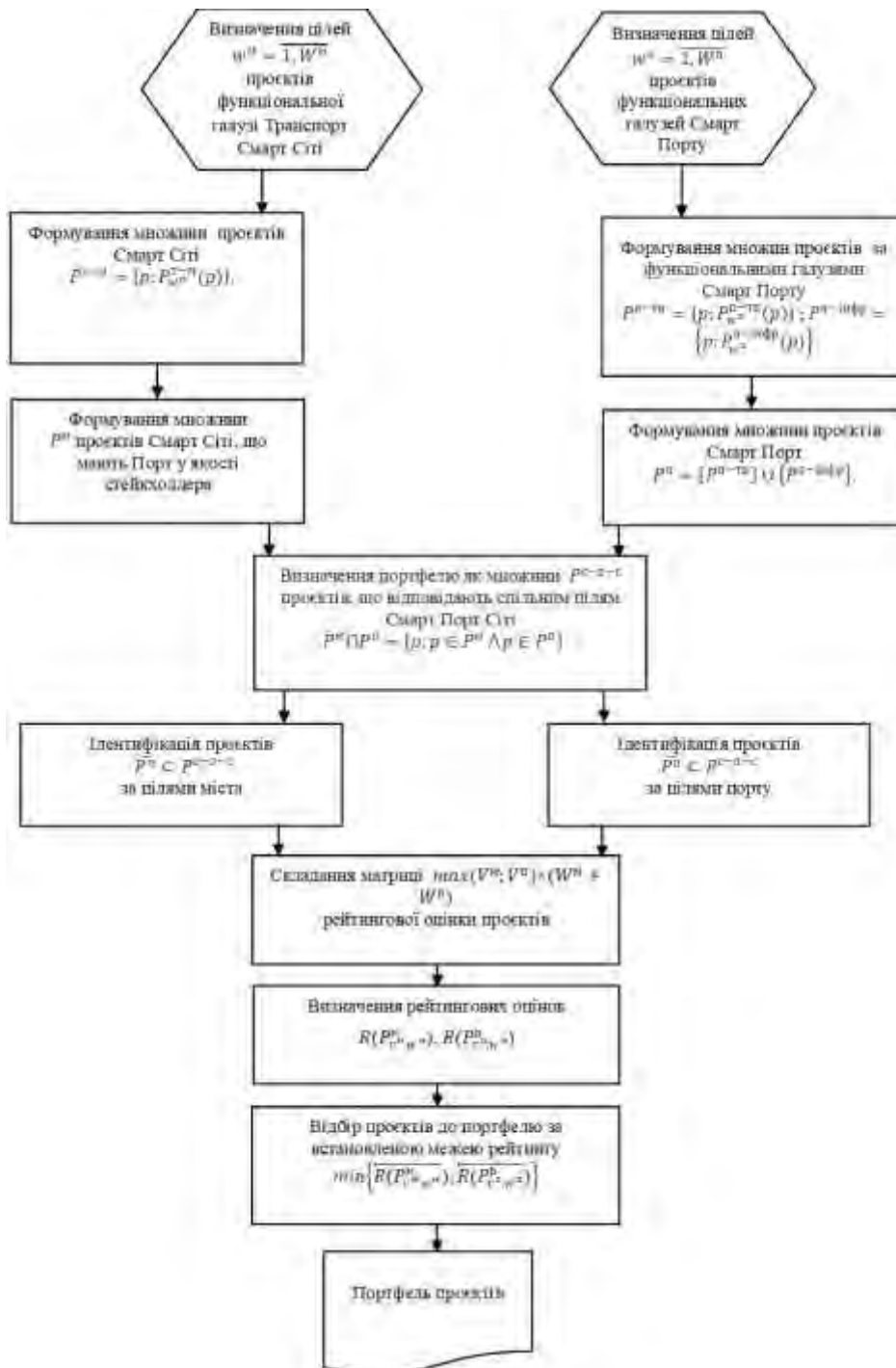


Рис. 2. Структурна схема етапів формування портфелю проектів та їх рейтингової оцінки

– Ідентифікація проектів Смарт Порт-Сіті з множини P^{c-n-c} , що належать до проектів Смарт Сіті $P^m \subset P^{c-n-c}$, за цілями w^m ($w^m = 1, W^m$).

– Ідентифікація проектів Смарт Порт-Сіті з множини P^{c-n-c} , що належать до проектів Смарт Порту $P^n \subset P^{c-n-c}$, за цілями w^n ($w^n = 1, W^n$).

– Побудова матриці розмірності $\max(V^m; V^n) \times (W^m + W^n)$ рейтингової оцінки (рис. 3) за структурою:

– загальна кількість рядків визначається як $\max(V^m; V^n)$;

– загальна кількість стовпців визначається як $W^m + W^n$;

- визначення рівня пріоритету $v^m = \overline{1, 2, \dots, V^m}$ для проектів P^m міського складника в лівій частині матриці відбувається за зростанням по рядках;
- визначення рівня пріоритету $w^n = \overline{1, 2, \dots, W^n}$ для проектів P^n портового складника в правій

частині матриці відбувається за зменшенням по рядках.

- Визначення рейтингових оцінок для міського складника – $R(P_{v^m, w^n}^m)$, для портового складника – $R(P_{v^n, w^n}^n)$.



Рис. 3. Установлення рівнів пріоритетності проектів Smart Порт-Сіті

- Визначення верхньої межі рівнів пріоритету як заданих значень $\overline{R(P_{v^m, w^n}^m)}$ та $\overline{R(P_{v^n, w^n}^n)}$ відповідно для міського й портового складника та загальної верхньої межі для Smart Порт-Сіті:

$$\min \left\{ \overline{R(P_{v^m, w^n}^m)}; \overline{R(P_{v^n, w^n}^n)} \right\}. \quad (9)$$

- До портфелю належать проекти, для яких

$$R(P_{v^m, w^n}^m) \leq \min \left\{ \overline{R(P_{v^m, w^n}^m)}; \overline{R(P_{v^n, w^n}^n)} \right\} \quad (10)$$

та

$$R(P_{v^n, w^n}^n) \leq \min \left\{ \overline{R(P_{v^m, w^n}^m)}; \overline{R(P_{v^n, w^n}^n)} \right\}. \quad (11)$$

Більш пріоритетними є такі проекти Smart Порт-Сіті, для яких установлений рівень рейтингу дорівнює 1, 2, ... Збільшення рівня відповідає зменшенню пріоритетності проекту.

Висновки

Проведений аналіз статистичної інформації та матеріалів із періодичних джерел, а також вивчення Генерального плану м. Одеси та інших нормативних документів, дав змогу виокремити найбільш значущі сучасні транспортні проблеми міста. Зі свого боку вони спонукають до ініціювання проектів, спрямованих на їх вирішення на базі сучасних концепцій і методологій.

Концепцією, що сприяє інноваційним рішенням з управління транспортом загального та особистого користування всіх видів на рівні окремого міста, є Smart Сіті. Виконана в цьому дослідженні систематизація цільовизначення відображає участь органів державного управління та суб'єктів комерційної діяльності міста в ініціюванні проектів за напрямом розширення сфери використання позавуличних видів транспорту. Для міст, у яких

особливу роль відіграє робота порту, значна кількість проектів ґрунтується на концепції Смарт Порт. Поєднання цих двох концептуальних засад набуло форми Смарт Порт-Сіті, яка містить чимало ініціатив проектів щодо створення нових сервісів для перспективного розвитку міст і портів, підвищення цінностей міського середовища та результативності портової виробничої діяльності.

У роботі запропоновано підхід до визначення проектів, що впливають із системного цілевизначення у розв'язанні транспортних проблем міста та проблем певних функціональних галузей порту. Розроблено методикку відбору проектів до портфелю з позицій

Смарт Порт-Сіті, що дає змогу, по-перше, ідентифікувати проекти, які відповідають спільним цілям міста та порту; по-друге, виконати рейтингове оцінювання проектів відповідно для міського й портового складника; по-третє, за встановленою межею визначити проекти з найбільшим пріоритетом.

Подальші дослідження будуть присвячені пошуку найбільш доцільних варіантів проектів з-поміж альтернатив: запровадження перевезень певними видами позавуличного транспорту, зокрема морським прибережним; комбіноване використання традиційних вуличних видів транспорту з позавуличними видами.

Список літератури

1. Храпкіна В. В., Солоха Д. В., Белякова О. В., Гевко В. Л. Концепти інноваційного розвитку підприємництва: монографія. Національний університет "Київо-Могилянська академія", Київ, 2018. 263 с.
2. Bushuyev S., Bushuyeva N., Bushuiev D., Bushuieva V. Cognitive Readiness of Managing Infrastructure Projects Driving by SMARTification. *IEEE European Technology and Engineering Management Summit, E-TEMS 2022*. Conference Proceedings. 2022. P. 196–201. DOI: <https://doi.org/10.1109/E-TEMS53558.2022.9944458>
3. Bushuyev S., Onyshchenko S., Bushuyeva N., Bondar A. Modelling projects portfolio structure dynamics of the organization development with a resistance of information entropy. *IEEE 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*. 2021. No. 2. P. 293–298. DOI: <https://doi.org/10.1109/CSIT52700.2021.9648713>
4. Biloshchyska S., Bondar A., Bushuyev S., Malaksiano N. Structure of the project-oriented organization energy entropy. *Scientific Journal of Astana IT University*. 2020. No. 3 (3). P. 28–34. DOI: <https://doi.org/10.37943/AITU.2020.33.24.003>
5. Rudenko S., Kovtun T., Smokova T. Breaking risk the integration links between the participants of transport and logistic infrastructure projects. *CEUR Workshop Proceedings*. 2021. Vol. 2851. P. 45–56. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2851> (дата звернення: 09.04.2023)
6. Lapkina I., Malaksiano M., Savchenko Y. Design and optimization of maritime transport infrastructure projects based on simulation modeling. *Proceedings of the 1st International Workshop IT Project Management (ITPM 2020)*. 2020. P. 36–45. URL: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85082109061&partnerID=MN8TOARS> (дата звернення: 09.04.2023)
7. Malaksiano M., Melnyk O. Effectiveness assessment of non-specialized vessel acquisition and operation projects, considering their suitability for oversized cargo transportation. *Transactions on Maritime Science*. 2020. Vol. 9. No. 1. P. 23–34. DOI: <https://doi.org/10.7225/toms.v09.n01.002>
8. Onyshchenko S., Bondar, A., Andrievska, V., Sudnyk, N., Lohinov, O. Constructing and exploring the model to form the road map of enterprise development. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 5. No. 3 (101). P. 33–42. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.179185>
9. Chumachenko I., Davidich N., Galkin A. Information support of simulation of vehicle flow distribution in urban projects of sustainable development. *Intelligent information systems for decision support in project and program management: collective monograph*. Riga, 2021. P. 25–41. DOI: <https://doi.org/10.30837/978-9984-891-21-7>
10. Davidich N., Galkin A., Iwan S., Kijewska K., Chumachenko I., Davidich Y. Monitoring of urban freight flows distribution considering the human factor. *Sustainable Cities and Society*. 2021. Vol. 75(103168). P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103168>
11. Davidich N., Galkin A., Sabadash V., Chumachenko I., Melenchuk T., Davidich Y. Projecting of urban transport infrastructure considering the human factor. *Scientific Letters of the University of Žilina*. 2020. Vol. 22. Issue 1. P. 84–94. URL: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85077917124&partnerID=MN8TOARS> (дата звернення: 09.04.2023)
12. Davidich N., Chumachenko I., Davidich Y., Taisiia H., Artsybasheva N., Tatiana M. Advanced Traveller Information Systems to Optimizing Freight Driver Route Selection. *13th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE)*. 2020. P. 111–115. DOI: <https://doi.org/10.1109/DeSE51703.2020.9450763>
13. Чечет А. М. Методи та моделі управління портфелем проектів надання транспортних послуг міст : автореф. дис. канд. техн. наук: 05.13.22. *Національний транспортний університет*. Київ, 2018. 20 с.
14. Lapkina I., Prykhno Y., Lapkin O. Content optimization of the development of multiproject of a shipping company. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 2. No. 3 (104). P. 50–57. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.199477>

15. Rudenko S., Shakhov A., Lapkina I., Shumylo O., Malaksiano M., Horchynskiy I. Multicriteria Approach to Determining the Optimal Composition of Technical Means in the Design of Sea Grain Terminals. *Transactions on Maritime Science*. Split, 2022. 11(1). P. 28–44. DOI: <https://doi.org/10.7225/toms.v11.n01.003>
16. Павлова Н. Л., Онищенко С. П. Концепція моделювання оптимальних параметрів проєктів портфеля проєктно-орієнтованої організації. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Математичне моделювання в техніці і технологіях*. 2020. № 1 (1355). С. 75–79. DOI: <https://doi.org/10.20998/2222-0631.2020.1.11>
17. Pavlova N., Onyshchenko S., Obronova A., Chebanova T., Andriievska V. Creating the agile-model to manage the activities of project-oriented transport companies. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 1. No. 3 (109). P. 51–59. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225529>
18. Vereshchaka N. Optimization of infrastructure project product parameters. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. 2020. No. 4 (14). P. 31–39. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.14.031>
19. Чисельність населення в місті Одеса. МінфінМедіа, URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/reference/people/town/odessa> (дата звернення: 09.04.2023)
20. Kyiv ranks 12th in TomTom's 2019 Traffic Index. *УНІАН Information Agency*. URL: <https://www.unian.info/kyiv/10852757-kyiv-ranks-12th-in-tomtom-s-2019-traffic-index.html> (дата звернення: 09.04.2023)
21. Лапкін О. О. Проблеми транспортної інфраструктури Одеси та проєкти для їх вирішення. *Вісник ОНМУ*. 2019. Вип. 3 (60). С. 109–123. DOI: <https://doi.org/10.33082/2226-1893-2019-3-109-123>
22. Lapkin O. Analysis of Odessa city's transport infrastructure and prospective ways of main problems solving. *Science Engineering and Technology: Global Trends, Problems and Solutions. Conference proceeding*. Prague, 2020. P. 150–154.
23. Beškovnik B., Bajec P. Strategies and approach for smart city-port ecosystems development supported by the internet of things. *Transport*. 2021. No. 36 (5). P. 433–443. DOI: <https://doi.org/10.3846/transport.2021.16194>
24. Lacalle I., Belsa A., Vaño R., Palau C. E. Framework and Methodology for Establishing Port-City Policies Based on Real-Time Composite Indicators and IoT: A Practical Use-Case. *Sensors*. 2020. Vol. 20(15), 4131 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20154131>
25. Bessid S., Zouari A., Frikha A., Benabdelhafid A. Smart Ports Design Features Analysis: A Systematic Literature Review. *13th International modeling, optimization and simulation conference (MOSIM2020)*. AGADIR, Morocco. 2020, URL: <https://hal.science/hal-03177580> (дата звернення: 13.04.2023)
26. Shcherbak D. The concept of a "Smart Port" in the context of innovative management of maritime complex. *Економика и финанси (Узбекистан)*. 2021. P. 125–127. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/the-concept-of-a-smart-port-in-the-context-of-innovative-management-of-maritime-complex> (дата звернення: 13.04.2023)
27. Smart Port City—towards a digital integration of city and port infrastructure. *Abo Akademi University*. вебсайт. URL: <https://www.abo.fi/en/news/smart-port-city-towards-a-digital-integration-of-city-and-port-infrastructure/> (дата звернення: 09.04.2023)
28. Port Blair Municipal Smart City Proposal. Solution Exchange for Urban Transformation of India. URL: <https://smarnet.niua.org/content/8158c700-fbae-4a86-8c20-759a96ab1116> (дата звернення: 13.04.2023)

References

1. Khrapkina, V., Sokokha, D., Beliakova, O., Gevko, V. (2018), *Concepts of innovative development of the enterprise: monograph*, National University of "Kyiv-Mohyla Academy", Kyiv, 263 p.
2. Bushuyev, S., Bushuyeva, N., Bushuiiev, D., Bushuieva, V. (2022), "Cognitive Readiness of Managing Infrastructure Projects Driving by SMARTification", *IEEE European Technology and Engineering Management Summit, E-TEMS 2022*, Conference Proceedings, P. 196–201. DOI: <https://doi.org/10.1109/E-TEMS53558.2022.9944458>
3. Bushuyev, S., Onyshchenko, S., Bushuyeva, N., Bondar, A. (2021), "Modelling projects portfolio structure dynamics of the organization development with a resistance of information entropy", *IEEE 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, No. 2, P. 293–298. DOI: <https://doi.org/10.1109/CSIT52700.2021.9648713>
4. Biloshchytska, S., Bondar, A., Bushuyev, S., Malaksiano, N. (2020), "Structure of the project-oriented organization energy entropy", *Scientific Journal of Astana IT University*, No. 3(3), P. 28–34. DOI: <https://doi.org/10.37943/AITU.2020.33.24.003>
5. Rudenko, S., Kovtun, T., Smokova, T. (2021), "Breaking risk the integration links between the participants of transport and logistic infrastructure projects", *CEUR Workshop Proceedings*, Vol. 2851, P. 45–56, available at: <https://ceur-ws.org/Vol-2851/> (last accessed 09.04.2023)
6. Lapkina, I., Malaksiano, M., Savchenko, Y. (2020), "Design and optimization of maritime transport infrastructure projects based on simulation modeling", *Proceedings of the 1st International Workshop IT Project Management (ITPM 2020)*, P. 36–45, available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85082109061&partnerID=MN8TOARS> (last accessed 09.04.2023).

7. Malaksiano, M., Melnyk, O. (2020), "Effectiveness assessment of non-specialized vessel acquisition and operation projects, considering their suitability for oversized cargo transportation", *Transactions on Maritime Science*, Vol. 9, No. 1, P. 23–34. DOI: <https://doi.org/10.7225/toms.v09.n01.002>
8. Onyshchenko, S., Bondar, A., Andrievska, V., Sudnyk, N., Lohinov, O. (2019), "Constructing and exploring the model to form the road map of enterprise development", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 5, No. 3(101), P. 33–42. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.179185>
9. Chumachenko, I., Davidich, N., Galkin, A. (2021), "Information support of simulation of vehicle flow distribution in urban projects of sustainable development", *Intelligent information systems for decision support in project and program management: collective monograph*, Riga, P. 25–41. DOI: <https://doi.org/10.30837/978-9984-891-21-7>
10. Davidich, N., Galkin, A., Iwan, S., Kijewska, K., Chumachenko, I., Davidich Y. (2021), "Monitoring of urban freight flows distribution considering the human factor", *Sustainable Cities and Society*, Vol. 75(103168), P.1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103168>
11. Davidich, N., Galkin, A., Sabadash, V., Chumachenko, I., Melenchuk, T., Davidich Y. (2020), "Projecting of urban transport infrastructure considering the human factor", *Scientific Letters of the University of Žilina*, Vol. 22, Issue 1, P. 84–94, available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85077917124&partnerID=MN8TOARS> (last accessed 09.04.2023)
12. Davidich, N., Chumachenko, I., Davidich, Y., Taisiia, H., Artsybasheva, N., Tatiana, M. (2020), "Advanced Traveller Information Systems to Optimizing Freight Driver Route Selection", *13th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE)*, P. 111–115, DOI: <https://doi.org/10.1109/DeSE51703.2020.9450763>
13. Chechet, A. M. (2018), *Methods and models for managing the portfolio of projects for the provision of transport services in cities [Metodi ta modeli upravlinnia portfelem proektiv nadannia transportnikh poslug mist]: Dissertation abstract: 05.13.22*, National Transport University, Kyiv, 20 p.
14. Lapkina, I., Prykhno, Y., Lapkin, O. (2020), "Content optimization of the development of multiproject of a shipping company", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 2, No. 3 (104), P. 50–57. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.199477>
15. Rudenko, S., Shakhov, A., Lapkina, I., Shumylo, O., Malaksiano, M., Horchynskyi, I. (2022), "Multicriteria Approach to Determining the Optimal Composition of Technical Means in the Design of Sea Grain Terminals", *Transactions on Maritime Science*, Split. 11 (1), P. 28–44. DOI: <https://doi.org/10.7225/toms.v11.n01.003>
16. Pavlova, N., Onyshchenko, S. (2020), "The concept of modeling the optimal parameters of the projects portfolio for a project-oriented organization", *Bulletin of the National Technical University "KhPI", Series: Mathematical modeling in engineering and technologies*, No. 1 (1355), P. 75–79. DOI: <https://doi.org/10.20998/2222-0631.2020.1.11>
17. Pavlova, N., Onyshchenko, S., Obronova, A., Chebanova, T., Andrievska V. (2021), "Creating the agile-model to manage the activities of project-oriented transport companies", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 1. No. 3 (109). P. 51–59. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225529>
18. Vereshchaka, N. (2020), "Optimization of infrastructure project product parameters", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, No. 4 (14), P. 31–39. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.14.031>
19. Number of inhabitants in Odesa, available at: <https://index.minfin.com.ua/ua/reference/people/town/odessa> (last accessed 09.04.2023)
20. "Kyiv ranks 12th in TomTom's 2019 Traffic Index", *UNIAN Information Agency*, available at: <https://www.unian.info/kyiv/10852757-kyiv-ranks-12th-in-tomtom-s-2019-traffic-index.html> (last accessed 09.04.2023)
21. Lapkin, O. (2019), "Transport infrastructure problems of Odessa and projects for their solution", *Herald of ONMU*, No. 3 (60), P. 109–123. DOI: 10.33082/2226-1893-2019-3-109-123
22. Lapkin, O. (2020), "Analysis of Odessa city's transport infrastructure and prospective ways of main problems solving", *Science Engineering and Technology: Global Trends, Problems and Solutions*, Prague, P. 150–154.
23. Beškovnik, B., Bajec, P. (2021), "Strategies and approach for smart city–port ecosystems development supported by the internet of things", *Transport*, No. 36 (5), P. 433–443. DOI: <https://doi.org/10.3846/transport.2021.16194>
24. Lacalle, I., Belsa, A., Vaño, R., Palau, C.E. (2020), "Framework and Methodology for Establishing Port-City Policies Based on Real-Time Composite Indicators and IoT: A Practical Use-Case", *Sensors*, Vol. 20(15), 4131. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20154131>
25. Bessid, S., Zouari, A., Benabdelhafid, A. (2020), "Smart Ports Design Features Analysis: A Systematic Literature Review", *13th International modeling, optimization and simulation conference (MOSIM2020)*, AGADIR, Morocco, available at: <https://hal.science/hal-03177580> (last accessed 09.04.2023)
26. Shcherbak, D. (2021), "The concept of a "Smart Port" in the context of innovative management of maritime complex", *Economics and Finance (Uzbekistan)*, P. 125–127, available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/the-concept-of-a-smart-port-in-the-context-of-innovative-management-of-maritime-complex> (last accessed 09.04.2023)

27. "Smart Port City—towards a digital integration of city and port infrastructure", *Abo Akademi University*, available at : <https://www.abo.fi/en/news/smart-port-city-towards-a-digital-integration-of-city-and-port-infrastructure> (last accessed 09.04.2023).

28. "Port Blair Municipal Smart City Proposal", *Solution Exchange for Urban Transformation of India*, available at: <https://smarnet.niua.org/content/8158c700-fbae-4a86-8c20-759a96ab1116> (last accessed 09.04.2023)

Received 16.05.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Бондар Алла Віталіївна – доктор технічних наук, доцент, Одеський національний морський університет, Навчально-науковий інститут морського бізнесу, Одеса, Україна; e-mail: ocheretyankaalla@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2228-2726>

Лапкін Олександр Олександрович – Одеський національний морський університет, Навчально-науковий інститут морського бізнесу, магістр з управління проєктами, здобувач рівня PhD, Одеса, Україна; e-mail: alpha666@te.net.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7403-2601>

Bondar Alla – Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Odessa National Maritime University, Educational and Scientific Institute of Marine Business, Odessa, Ukraine.

Lapkin Oleksandr – Odessa National Maritime University, Educational and Scientific Institute of Marine Business, Master of Project Management, Student of PhD course, Odessa, Ukraine.

METHODS AND MODELS FOR FORMATION A PORTFOLIO OF URBAN TRANSPORT DEVELOPMENT PROJECTS BASED ON THE SMART PORT CITY CONCEPT

Renovation of public transport fleets was carried out in different cities of the state before the outbreak of hostilities. In year 2020 "Urban public transport of Ukraine II" project was approved by the Government. Among eighteen cities-participants of this project, Odessa was the only one that had a maritime transport usage option. However, the specifics of the territorial location and the experience accumulated by the previous decades in the maritime coastal communications were not taken into account by that project. **This article aims** to study the specific features of the city's transport infrastructure development projects portfolio formation with the involvement of the off-street transport modes (including its maritime component), based on the latest Smart Port City concept, which reflects the harmonious targeting of the city and port development main directions. **Results.** Smart City is the concept, which encourages innovative solutions to the management of all transport types at a particular city level. The carried-out goals systematization reflects the involvement of the city's public administration and commercial players into the initiation of projects intended to enhance the use of off-street transport types. The ability to initiate a wide range of projects is provided by Smart Port concept to cities where the port operation role is decisive. The combination of these two concepts is presented in the form of Smart Port City, which contains the foundation for a significant number of project initiatives for new products and services in the promising areas of city and port development, improving the quality of urban environment and the port production operations efficiency results. **Conclusions.** The approach to determine projects structure, which is based on a system of objectives to resolve the city transport problems and ensure the port development, has been proposed. The formalized procedure of projects selection to the portfolio from the Smart Port City perspective has been developed, which allows: first, – to identify projects that match the city and the port general goals; second, – to produce a rating system for the city and the port projects respectively; third, – given the set threshold value, to identify the projects with the highest priority.

Keywords: project; portfolio; urban transport; off-street transport; Smart Port-City.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Бондар А. В., Лапкін О. О. Методи й моделі формування портфелю проєктів розвитку міського транспорту на базі концепції Смарт Порт-Сіті. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 2 (24). С. 179–190. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.179>

Bondar, A., Lapkin, O. (2023), " Methods and models for formation a portfolio of urban transport development projects based on the smart port city concept", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (24), P. 179–190. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.179>

S. BUSHUYEV, K. PILIUHINA, ELAMS CHETIN

TRANSFORMATION OF VALUES OF THE HIGH TECHNOLOGY PROJECTS FROM A VUCA TO A BANI ENVIRONMENT MODEL

The article is dedicated to the study of impact of a BANI-world conditions to implementation of the high technology industrial projects and in particular of the nuclear industry projects. **The purpose** of the article is to analyze tendencies of changes of different factors related to the high technology nuclear project implementation against the changing conditions of the environment. **The object** is the project management methodologies in the BANI environment. **The subject is** theoretical analysis of the values differentiation in between the VUCA and BANI worlds, key aspects of BANI impacting implementation of the nuclear projects. **Tasks to be solved:** to analyze the transformation from the VUCA model to the BANI model, to present values and their differentiation as the basis for survival in the new world order, to develop a method for assessing project risks in the BANI environment. **Methods:** practical empirical analysis of nuclear project risks in comparison with BANI-model forecasts, applied research, project risk management methodology, probability theory. **The following results were obtained:** the differences between the values of s VUCA and BANI are determined, an understanding of the general changes that have arisen due to the functionality of the environment is provided, the project management methodology applicable in the BANI environment is analyzed, a qualitative and quantitative risk analysis based on BANI projections is implemented on the example of a nuclear project in Ukraine, and the grounds for determining the most influential BANI forecast are proposed. The main results of the research are identification and analysis of values and their differentiation in the process of transformation from the VUCA to the BANI world, proposals for the project management approach which could cover the needs of the nuclear project and the consequences of this transformation. To estimate risks, it was proposed to use qualitative and quantitative methods of risk assessment. The case study of one of the nuclear projects in Ukraine, and a mixed classic-Agile methodology for the management of the nuclear project was performed. **Conclusions:** risk management of the nuclear projects has to be carried out based on the impact of the BANI-projections to identified risks.

Keywords: VUCA-world; BANI-world; high technology project; nuclear project; values; risk management.

Introduction

Nowadays high technology industries hold a leading position amongst the factors forming the future of the world. Over the demanding period of COVID-19 high technologies were those pillars which prevented the world economics from a complete crash. And they keep poisoning this trend now at the time of one of the most serious global challenges underway caused by the military invasion of Russia into Ukraine.

In accordance with the analytics of the consulting organization McKinsey&Company [1] clean energy and net-zero technologies were amongst first 14 high technology trends in 2022. And given the energy resources crisis resulted from the Russian-Ukraine war nuclear energy got a second wind as one of the technologies being able to rescue the world with its growing energy demand.

Deployment of innovative nuclear technologies and their implementation within the European Energy sector by 2050 is one of the main objectives of the European Green Deal.

However, nuclear energy has also been undergoing the processes related to today's uncertain, anxious, and unpredictable world. A number of projects under

implementation within the Horizon Europe Euratom Research and Training Programme faced project management difficulties related to implementation of the projects in a new reality. They feel a need to create a sound project management instrument which could become a fundamental basis for stable and smooth project realization in these circumstances.

Back in 2020, an American futurist Jamais Cascio in his article "Facing the Age of Chaos" [2] advocated an entirely new age the humanity entered in with COVID-19. The volatile, uncertain, complex and ambiguous model of world structure called VUCA was replaced by the brittle, anxious, non-linear and incomprehensible model BANI. This inference obtained even more evidence on 24th February 2022 when the world found itself with the giant bleeding wound on its body due to Russian military aggression against Ukraine.

This makes special sense in the nuclear field where nuclear safety is considered by most of the international documents as a priority, and the fundamental safety objective is to protect people and the environment from harmful effects of ionizing radiation [3].

Nuclear safety is one of the important policies related to the peaceful use of nuclear energy. It builds a synergy with two other important policies aiming

to prevent the spread of nuclear weapons, facilitating disarmament and physical protection of nuclear facilities: nuclear security and safeguards.

These policies are ensured by the state nuclear regulatory authorities and other policy making state organisations, but their implementation is the responsibility of all the stakeholders of the nuclear energy field. This turns to the point that each nuclear related project shall follow the requirements of the state in the nuclear field to guarantee:

- Protection of people and the environment from harmful effects of ionizing radiation [3]
- Prevention of unauthorized use of nuclear materials [4]
- Non-proliferation of nuclear weapons and disarmament [4].

After the Chernobyl Accident in 1986, Fukushima Accident in 2011 a number of nuclear safety basics and principles were revised, enforced and established in the different international documents, conventions and agreements undersigned by most of the countries in the world having any relation to the peaceful use of nuclear energy. By those, the serious gaps in the legislation and regulations, which made the accidents possible, had been addressed.

The transformation from the VUCA model to the BANI framework involves shifting the focus from volatility, uncertainty, complexity, and ambiguity (VUCA) to a new set of factors: Bounded, Ambiguous, Non-Linear, and Incomprehensible (BANI). The BANI framework provides a different perspective on the challenges and dynamics of the business environment. Below is a description of the BANI framework and its components:

Brittle (B) in BANI refers to boundedness, indicating that there are limitations and constraints within the business environment. These boundaries can be physical, regulatory, or resource-related. Recognizing and understanding these limitations is essential for decision-making and resource allocation.

Anxious (A) in BANI stands for ambiguity, highlighting the presence of multiple interpretations, perspectives, and uncertainties within the business landscape. Ambiguity implies that there may be different and conflicting information or signals, making it challenging to determine the right course of action.

Non-linear (N) in BANI represents non-linearity, indicating that cause-and-effect relationships are not always straightforward or predictable. Non-linear

dynamics suggest that small changes or disruptions can have disproportionate and unpredictable impacts on the business ecosystem.

Incomprehensible (I) in BANI denotes incomprehensibility, emphasizing the difficulty in fully understanding and making sense of the complex and rapidly changing business environment. The incomprehensible nature of the landscape makes it challenging to develop comprehensive models or strategies that accurately capture the dynamics at play.

The BANI framework provides an alternative perspective to the VUCA model by shifting the focus to boundedness, ambiguity, non-linearity, and incomprehensibility. This framework helps organizations recognize and navigate the constraints, uncertainties, and complexities of the contemporary business landscape.

Therefore, an entire change of the framework, inside which today's world has to function, is strongly required. Although the need for immediate changes is considerably high it still will take time.

Moreover, the realities of BANI-environment also put the world nuclear community into a situation where protection of people and environment from ionizing radiation, non-proliferation of nuclear weapons and physical protection of nuclear facilities are still the highest priorities of their day-to-day work. And it requires both from the responsible state authorities and other nuclear field players invent of new approaches to overcome the brittleness, anxiety, non-linearity and incomprehensibility of BANI-environment. Whilst the international nuclear community and state authorities reach all necessary conclusions on the documentation owed to be changed and introduce these changes, the new approaches to the management in the nuclear field should be worked out by the project managers in the nuclear field.

Hence, the analysis of the prerequisites for creation of these approaches has a proven topicality on the way of getting an understanding of the appropriate managerial model successful in the BANI-world we just entered into [5]. Each of the words the BANI acronym consists of could be a starting point of this analysis.

1. VUCA and BANI models

The VUCA model formed a picture of the world in 2000s. Coming back to this time in the memory we realize that the following nouns distinctly describe the situation with the key skills workable that time:

Volatility: speed of life increased considerably, which enforced businesses, markets, governments, workers to respond and change time of reaction, maintain high level of concentration to follow all the possible immediate changes and address them (concentration and immediate reaction).

Uncertainty: it became impossible to predict when and to which point things could change, what kind of changes it would be, what instruments would be needed to overcome these changes. Long-term strategies have become irrelevant (readiness and ability to solve big issues with short-term discrete strategies).

Complexity: globalization, disappearing cultural differences in the developed countries and extension of IT-technologies utilization in all areas of life made the world interconnected, multi-angled, multi-tooled and complicated which makes it almost impossible to understand in full scope (ability to build clear structures).

Ambiguity: cause and effect don't have a usual sequence and logic anymore, everything which seemed to be well-known and clear started to be not logical, irrational (analytical skills, ability to make non-standard decisions).

In regard to BANI acronym, it appeared to become worlds reality at the time of COVID-19 Pandemics in 2020 and shockingly continued its manifestation in 2022 with the Russian-Ukrainian war. It has the following characteristics and useful skills to override:

Brittle: systems, stable yesterday, today stop working and crash, they are not stable anymore, principles and standards don't work, regulations don't regulate, all the past basics seem to have collapsed. The world suddenly changes, but it's unclear what are the rules to follow now and which direction to take. It becomes much wider than volatility (stress resistance, creativity, sense of correct direction/solution).

Anxious: changes could be horrifying, sometimes crash is such a big and unbelievable that consciousness needs time to accept this being a reality. Although recognized as reality, a new world is so unclear and chaotic that continuously keeps anxiety awake. Unlimited access to various resources of information enforces anxiety as well (informational selectivity, analytical skills, gut feeling).

Non-linear: there is the same situation with the cause-and-effect rule as in VUCA – it still doesn't work. Nevertheless, in VUCA model it was not workable due to 2D complexity of interconnections in all the areas, whilst in BANI model it is not workable due to 3D chaos everywhere (open mind, flexibility).

Incomprehensible: it is impossible to understand what is going on and no way to get immediate solution to everything, because there is no way to collect all the pieces of puzzle and no way to capture everything by the human mind (open-heart, trust) [6].

Chaos could be defined through the thermo- and fluid dynamics terms where chaos is called entropy or, if we speak about the flow, they use the term "turbulency". The turbulency is a flow stable from the beginning but losing its stability with increasing velocity. The flow undergoes changes in different directions and the initially stable flow layers start to mix up.

Research studies of the turbulency have been widely utilizing the equations of English physicist O. Reynolds, which however, don't provide a universal description of the turbulent flow and its behavior.

Moreover, Reynolds' equations could be applied only based on hypotheses and different speculations to be followed by the experimental data since the turbulent flow holds numerous uncertainties and could not be simply described neither by one nor by the system of equations. The turbulent flow is uncertain and unpredictable, but even so it is still possible for human beings to invent high technologies based on the data they obtained during the experiments and case studies.

On the contrary to the existence of uncertainties in turbulent flows humanity has succeeded with the invention of the airplanes, spacecrafts, engines, energy technologies which are working in turbulent conditions. Entering the airplane, we recognize and accept that uncertain and unpredictable environment becomes the basis of our being for the next several hours. And we can easily live with this. Every time before taking off we are instructed by the crew on how to mitigate turbulency consequences which might happen in the course of the flight, and it helps a lot to build a tangible structure in this uncertain environment. And it is a good example of how the VUCA model works.

Today, we are in the same airplane, but we don't know which direction to fly. It is because today we entered the BANI-world.

The VUCA model provides a solution on how to survive in a volatile, uncertain, complex and ambiguous world. The VUCA model has become a respond to entire digitalization and globalization of all the processes in the world which cut a ground underneath humanity's foot. The business world required a sound instrument, industries required a sound instrument, technologies required a sound instrument as well as governments and households to adapt

themselves to a new racing reality where nobody knew the rules of the game anymore.

The transformation scheme from VUCA to BANI presented of fig.1.

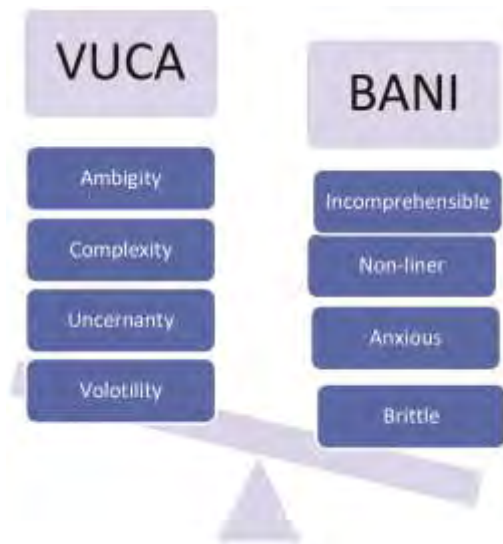


Fig. 1. Transformation from VUCA to BANI

Whilst challenges of BANI are brittleness, anxiety, non-linearity and incomprehensibility. Which means that everything we have might be destroyed in one second by something which we are not able to predict or prevent. Long-term strategies and planning are not valid anymore, we have to learn how to live in a discrete reality and how to build a discrete schedule for our day-to-day life and business processes.

2. Values as a basis for survival in a new world structure

Values are important factors for people's lives and are formed out of people's principles and personal beliefs. This is what helps to make decisions, establish priorities, estimate risks and align actions within members of the project teams. In project management, values often form the basis of a culture and an atmosphere inside the project and can influence an overall strategic direction of project implementation. Values can create a positive impact in various aspects of life as well as facilitate building strong relationships, productive collaboration and leadership inside the project. Values are an instrument of flexibility and easy adaptation in complex and deadlock situations.

Identifying and maintaining the values improves decision-making and goal-setting processes and causes personal growth of each member of the team.

All these make evident that value-oriented project management gives a serious chance to survive in all unpredictability of today's world.

Although both VUCE and BANI models seem to have similar values and the same instruments and approaches to be dealt with, as stated above, they belong to two different worlds with a variety of values, which might have the same name with completely different content dictated by the specifics of environment.

For instance, the VUCA values include but are not limited by the following: speed of decision making, adaptability, awareness, owning and managing the information, clear procedures, maintaining communication and visibility, team building.

These values look like the components of the classic approach to project management, which aims to build a clear project structure, with a strong team and reliable spread of roles and responsibilities. This model envisages risk analysis of the project and development of solutions on their mitigation on a regular basis.

Success of the project implementation in the VUCA world relies considerably on the awareness of the various project stakeholders about the project activities with its interim and final results. Making stakeholders of high technology projects aware of the progress and status of the project implementation is an action of ultimate importance since they are the ears of the project and its connection with the external environment. The way the stakeholders react to one or another piece of information, innovative approach or alternative solution helps the project to be continuously in touch with the changing world and quickly adapt to it.

In order to keep orientation in the airplane which goes in unknown and unpredictable direction all senses of the body, consciousness and unconsciousness have to be ready to communicate with the surrounding environment. Short-term planning, small teams, flexible deadlines as well as other attributes of discrete project management are needed in this case, which could be completely covered by utilization of an Agile project management approach [7, 8]. This approach has been widely used by the IT industry for a long time and justified its effectiveness and efficiency. Hence, could be successfully implemented in the other high technology areas.

Taking into account the situations Ukraine and world faced during COVID-19 Pandemic high technologies are core fundamentals which can stabilize the world whilst the Russian-Ukrainian war made humanity to learn a lesson that at the same time high-technology industries are the most sensitive parts

of the world: power stations and high-voltage lines could be destroyed by heavy shelling, nuclear power plant could be captured by militaries, data banks could be hacked, damaged and stolen, data management servers could be malfunctioned. And when these stop the whole cities stop. The words "safety", "safety culture", "qualified engineering personnel", "leadership" and "trust" have become those values the BANI world is not able to survive without.

The analysis of values and their differentiation (Table 1) shows that the new BANI world is mostly based on feelings and requires a person not only to be a project manager, but also empathy, flexibility [9] and case orientation through constant analysis and risk mitigation of the BANI environment.

Table 1. Values of VUCA and BANI models

VUCA model values	BANI model values	
	COVID-19	Russian–Ukrainian war
speed of decision making	health	Nuclear safety
adaptability	day-to-day safety culture	Nuclear safety culture
awareness	qualified medical personnel: hospital-based and research	Nuclear security
owning and managing the information	empathy	qualified engineering personnel
clear procedures	feelings	Flexible leadership
maintaining communication and visibility	intuition	trust
team building		weapons

Simultaneously, nuclear safety basic principles alongside the need to build a trustworthy project team made of highly qualified engineers have become real values for the nuclear projects in BANI-environment.

3. Risk management in BANI-environment

Risk management [10] in the high-technology nuclear project requires continuous attention and regular analysis by the project manager [11, 12]. Risk management was one of the main pillars of the project management in nuclear in the period of 2000–2022 years covering a VUCA-time.

Starting from 2022 risk management has become one of key instruments which allows project manager of the nuclear project ensure nuclear and radiation safety,

radiation protection, prevention of unauthorized use of sources of ionizing radiation in the BANI-world [13, 14].

BANI-model projections are considered against the risks in one of the nuclear projects in Ukraine. This project is being implemented under the EU funded INSC (Instrument for nuclear Safety Cooperation) Programme, which has been providing support to uranium processing plant in Ukraine since 2014.

Apparently, it is clear that the risks of successful implementation of any project in the conditions of on-going war in Ukraine could be considered as high. However, the priority of nuclear safety is still one of the fundamentals in nuclear field, hence the European Commission keeps supporting nuclear safety actions in Ukraine and in particular PChP site despite the existing risks. It emphasizes one more time that risk management is considered as one of the primary instruments to ensure successful implementation of the nuclear projects.

Risk assessment in nuclear projects can be performed using qualitative and quantitative methods [15].

Table 2 and Fig. 2 consider risks of the works oriented nuclear project, main site of which is located close to the territory of intensive military actions in Ukraine.

A qualitative analysis will help to prioritize risks. This considers the estimates of the significance of risk factors calculated based on the probability of the factor and the degree of impact on the project. One way to qualitatively risk assess is to use a probability and impact matrix (Table 3). Based on this table, we will obtain qualitative assessments of risk factors. The integral score for each of the BANI projections can be obtained as the maximum of each factor, using the pessimistic principle (Table 4).

Thus, we have two subsets with the elements equivalent to:

$$F1 = \{\text{Brittleness, Anxiety}\},$$

$$F2 = \{\text{Non-linearity, Incomprehensibility}\},$$

and ordered by decreasing risk level:

$$R(F2) > R(F1).$$

To quantify the risk, we apply a probabilistic approach, considering risk factors as random independent compatible events. Then the probability of occurrence of at least one factor is calculated using the formula for adding a set of independent events (for two factors and for three):

$$P(A + B) = P(A) + P(B) - P(AB).$$

$$P(A+B+C) = P(A) + P(B) + P(C) - P(AB) - P(AC) - P(BC) + P(ABC),$$

where A, B, C – the first, second or third factor.

Table 2. Risk assessment of the nuclear safety project through the projections of BANI environment*

	Risks	BANI-projections	Probability, %	Impact, %
1	Threat to project implementation to the war: no further sense for the EC to support physical works at the site under shelling.	Brittleness		
		Project could be stopped by the EC;	50	100
		Site could be heavily shelled	30	100
		Results delivered by the project could be destroyed	20	100
2	Threat of destroying the site, equipment, constructed objects.	Anxiety		
		EU technologies could be captured	10	80
		Shelling could cause a release of radioactive contamination of the environment	40	80
		Workers are not protected.	30	100
3	Ukrainian side is not able to contribute into a partnership with EU: project recipient has not been financed.	Non-linearity		
		Changing the course of the state budgeting due to the martial law	90	100
		UA experts could join military actions with high probability not to come back	60	100
4	Adoption of legislation and regulations required for project implementation is delayed or suspended.	Incomprehensibility		
		Changing priorities of the state authorities	90	70
		Project team has no reliable legal instruments to support their site work under the project	90	80

* EU Project on Support of the clean-up of the former uranium processing plant in Ukraine

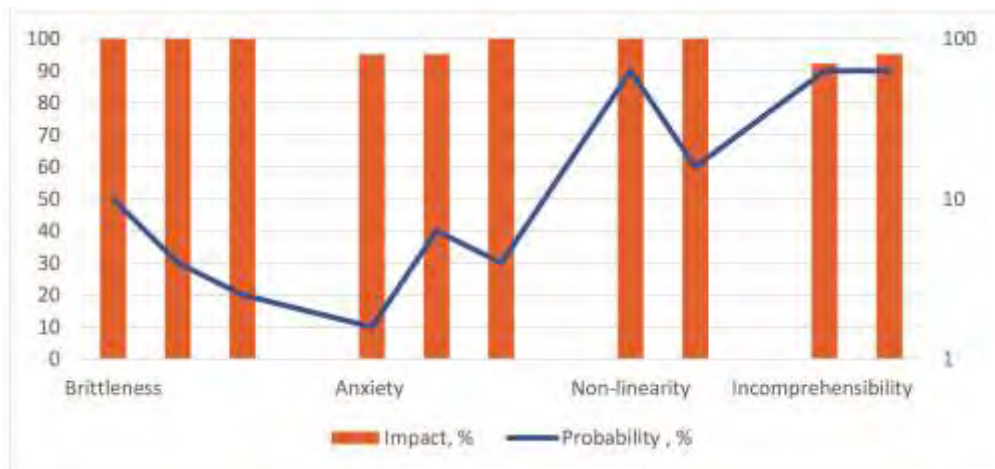


Fig. 2. Impact of the BANI-model projections to implementation of the EU project in Ukraine*

Table 3. Probability and impact matrix

Probability of risk factor appearance	Impact of the risk factor (percentage of project losses)				
	Very low <20%	Low [20–40] %	Average [40–60] %	High [60–80] %	Very high >80%
[0–0,2]	vl	vl	vl	a	a
(0,2–0,4]	vl	vl	l	a	h
(0,4–0,6]	vl	l	l	h	h
(0,6–0,8]	vl	l	a	h	ah
(0,8–1]	vl	a	a	ah	ah

Table 4. Qualitative assessments of factors and BANI projections

BANI projections and factors	Risk level
Brittleness	high
The project could be stopped by the EU;	high
The site could be shelled	high
Project results could be destroyed	average
Anxiety	high
EU technologies could be captured	average
Shelling could lead to the release of radioactive contamination into the environment	average
Workers are not protected.	high
Non-linearity	very high
Changes in the state budget course due to martial law	very high
UA experts could join the fighting with a high probability of not returning	very high
Incomprehensibility	very high
Changing priorities of the state authorities	very high
The project team does not have reliable legal tools to support the work of the website within the project	very high

Given that the degree of risk according to two indicators is calculated as their product

$$R = P \times S,$$

where P – is the probability of the factor,

S is the impact of the factor (possible losses),

then the integral risk assessment according to the corresponding BANI projections can be obtained by the following formulas:

$$R(A, B) = S_A P(A) + S_B P(B) - \max(S_A, S_B) P(AB);$$

$$R(A, B, C) = S_A P(A) + S_B P(B) + S_C P(C) - \max(S_A, S_B) P(AB) - \max(S_A, S_C) P(AC) - \max(S_B, S_C) P(BC) + \max(S_A, S_B, S_C) P(ABC).$$

As a result, we obtained the following quantitative risk estimates for the studied projections:

$$R(\text{Brittleness}) = 69$$

$$R(\text{Anxiety}) = 54$$

$$R(\text{Non-linearity}) = 99$$

$$R(\text{Incomprehensibility}) = 98$$

It can be stressed that even in such a conditions BANI's brittleness and anxiety have no extensive impact on it being, however, factors which may directly intervene into the processes of the project. Whilst the non-linear and incomprehensive processes on-going in the political system of Ukraine and priorities made by the state authorities still are important and can hamper the project implementation.

This is a good sign of stability inside the system which is able to keep it inside the BANI environment. It demonstrates that there are some pillars in the high-technology projects which could not be broken even by direct intervention of physical accidents related to the war. Nuclear safety, security of the nuclear

facilities are stable in the BANI-world and projects aimed to enhance them will have been supported despite the danger resulted from the war.

Conclusion

Entering BANI-environment has a considerable impact on the implementation and methodology of high technology nuclear projects.

Characteristics of values of the BANI model have been functionally changed compared with the VUCA model.

BANI-projections influence risk analysis and management of nuclear projects, and it is reasonable to study them in connection to a particular case.

The transformation of values of high technology projects from a VUCA to a BANI environment model reflects the evolving nature of the business landscape, particularly in the context of high technology projects. The VUCA model, which emphasizes volatility, uncertainty, complexity, and ambiguity, has been widely used to describe the challenges and dynamics of the business environment. However, as technology continues to advance rapidly and disrupt traditional business models, a shift towards the BANI framework offers a more relevant and comprehensive perspective.

In the BANI framework, the focus shifts towards boundedness, ambiguity, non-linearity, and incomprehensibility. High technology projects often operate within certain boundaries and constraints, whether they are regulatory, resource-related, or technological limitations. Recognizing these boundaries is crucial for effective decision-making and resource allocation.

Ambiguity plays a significant role in high technology projects, as they often involve multiple interpretations, competing perspectives, and uncertainties. The ability to navigate through ambiguous situations and make informed decisions becomes paramount in this environment.

Non-linearity highlights the complex and interconnected nature of high technology projects. Small changes or disruptions in technology or market conditions can have significant and unpredictable impacts on the project outcomes. Understanding non-linear dynamics helps project managers anticipate and respond to unexpected challenges and opportunities.

Lastly, high technology projects often operate in an incomprehensible environment, where the rapid pace

of technological advancements and the complexity of interactions make it challenging to fully understand and predict outcomes. This incomprehensibility necessitates agile and adaptive approaches, continuous learning, and an openness to experimentation and innovation.

In conclusion, the transformation from a VUCA to a BANI environment model acknowledges the unique characteristics of high technology projects and provides a more nuanced understanding of the challenges and opportunities they present. By embracing the bounded, ambiguous, non-linear, and incomprehensible nature of the high technology landscape, project managers can better navigate and succeed in this rapidly evolving domain.

References

1. Chui, M., Roberts, R., Yee, L. (2022), McKinsey Technology Trends Outlook 2022", *McKinsey and Company*, available at: <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/the-top-trends-in-tech>
2. Cascio, J. (2020), "Facing the Age of Chaos", available at: <https://medium.com/@cascio/facing-the-age-of-chaos-b00687b1f51d>
3. European Atomic Energy Community, (2006), Food and Agriculture organization of the United Nations, International Atomic Energy Agency, International Labour Organization, International Maritime Organization, OECD Nuclear Energy Agency, Pan American Health Organization, United Nations Environment Programme, World Health Organization, Fundamental Safety Principles, IAEA Safety Standards Series No. SF-1, IAEA, Vienna
4. IAEA. INFCIRC/140, (1970), "Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons", *International Atomic Energy Agency*, available at: <https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/documents/infircs/1970/infirc140.pdf>
5. Godoy, M. F. de, Ribas Filho, D., (2021), "Facing the BANI World", *International Journal of Nutrology*, 14(2), 33. DOI: <https://doi.org/10.1055/s-0041-1735848>
6. Obradović, V., Todorović, M., Bushuyev, S., (2018), "Sustainability and Agility in Project Management: Contradictory or Complementary?", *2018 IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, Lviv, Ukraine, P. 1–5, DOI: 10.1109/STC-CSIT.2018.8526666.
7. Bushuyev, S., Tanaka, H., Elmas, Ch., Babayev, I., (2022), "Inspirational intuition and innovation in it project management", *Scientific Journal of Astana IT University*, No. 10. DOI: <http://dx.doi.org/10.37943/IXYM7063>
8. Bushuyev, S., Verenysh, O., (2018), "The Blended Mental Space: Mobility and Flexibility as Characteristics of Project/Program Success", *IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies*, CSIT 2018. DOI:10.1109/STC-CSIT.2018.8526699
9. "Individual competence baseline for Project, Programme and Portfolio management (IPMA ICB)", *IPMA*, 2015. Version 4.0. 431 p.
10. "IPMA Organisational Competence Baseline (IPMA OCB)", *IPMA*, 2013. 67 p.
11. Todorović, M., Petrović, D., Mihić, M., Obradović, V., Bushuyev, S., (2014), "Project success analysis framework: A knowledge-based approach in project management", *International Journal of Project Management*, DOI:10.1016/j.ijproman.2014.10.009
12. Kosenko, V, Bugas, D (2015), "Effectiveness analysis of resource usage of multiservice information and telecommunication network", *Technology audit and production reserves*, Vol. 5. No. 2(25). P. 19–23. DOI: 10.15587/2312-8372.2015.51710
13. Kosenko, V. (2017) "Principles and structure of the methodology of risk-adaptive management of parameters of information and telecommunication networks of critical application systems", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1(1), P. 46–52. DOI: 10.30837/2522-9818.2017.1.046
14. Bondar, A., Onyshchenko, S. (2020), "Experimental studies of a model for optimizing the portfolio of a project-oriented organization based on the entropy concept", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4(14), P. 21–30. DOI: 10.30837/ITSSI.2020.14.021

15. Bondar, A. (2020), "Energy-entropic value of organization's resources", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (12), P. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.12.005>

Received 10.06.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Бушуєв Сергій Дмитрович – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури, завідувач кафедри управління проєктами, Київ, Україна; e-mail: sbushuyev@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7815-8129>

Пілюгіна Катерина Вікторівна – Європейська мережа ядерної освіти, керівник проєкту, Бельгія; e-mail: k.piliuhina@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0850-6842>

Еламс Четін – PhD, професор Університету Газі, Анкара, Туреччина; e-mail: cetinelmas@hotmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9472-2327>

Bushuyev Sergiy – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture, Head of project management department, Kyiv, Ukraine.

Piliuhina Kateryna – Project manager, European Nuclear Education Network, Belgium.

Elams Chetin – PhD, Professor Gazi University, Ankara, Turkey.

ТРАНСФОРМАЦІЯ ЦІННОСТЕЙ ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЄКТІВ З МОДЕЛІ СЕРЕДОВИЩА VUCA ДО BANI

Стаття присвячена дослідженню впливу умов BANI-світу на реалізацію високотехнологічних індустриальних проєктів, зокрема атомної промисловості. **Мета статті** – аналіз тенденції зміни різних факторів, пов'язаних із реалізацією високотехнологічного ядерного проєкту, на тлі мінливих умов довкілля. **Об'єкт дослідження** – методології управління проєктами в середовищі BANI. **Предметом вивчення** є теоретичний аналіз диференціації цінностей між середовищами VUCA та BANI, ключовими аспектами BANI, що впливають на реалізацію ядерних проєктів. **Завдання роботи**: проаналізувати трансформацію з моделі VUCA на BANI, подати цінності та їх диференціацію як основу виживання в новій світобудові, розробити метод оцінювання ризиків проєкту у BANI-середовищі. **Методи дослідження**: практичний емпіричний аналіз ризиків ядерного проєкту, порівняння з прогнозами BANI-моделі, прикладне дослідження, методологія управління проєктними ризиками, теорія ймовірності. **Здобуті результати**. Подано різницю між поняттями VUCA та BANI, визначено загальні зміни, що виникли завдяки функціональним можливостям середовища, проаналізовано методологію управління проєктом, що застосовується в середовищі BANI. Здійснено якісний і кількісний аналіз ризиків на основі прогнозів BANI на прикладі ядерного проєкту в Україні, запропоновано підстави для визначення найбільш впливового прогнозу BANI. Основними результатами дослідження є ідентифікація та аналіз цінностей та їх диференціація в процесі трансформації від середовища VUCA до середовища BANI, надання пропозицій щодо управління, яке могло б задовольнити потреби ядерного проєкту та наслідки зазначеної трансформації. Для оцінювання ризиків запропоновано використовувати якісні та кількісні методи визначення ступеня ризику. На прикладі одного з ядерних проєктів в Україні було розглянуто змішану класично-гнучку методологію управління проєктом. **Висновки**: управління ризиками ядерних проєктів має здійснюватися на основі впливу BANI-прогнозів на виявлені ризики.

Ключові слова: VUCA-світ; BANI-світ; високотехнологічний проєкт; ядерний проєкт; цінності; управління ризиками.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Бушуєв С. Д., Пілюгіна К. В., Еламс Четін. Трансформація цінностей високотехнологічних проєктів з моделі середовища VUCA до BANI. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 2 (24). С. 191–199. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.191>

Bushuyev, S., Piliuhina, K., Elams Chetin (2023), "Transformation of values of the high technology projects from a VUCA to a BANI environment model", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (24), P. 191–199. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.191>

V. PITERSKA, V. SAMOILOVSKA, V. SHAKHOV, HIROSHI TANAKA

RISK-ORIENTED MANAGEMENT OF PORTS IN THE IMPLEMENTATION OF CONCESSION PROJECTS

The subject matter of research in the article is the models and methods of risk management in the process of implementing concession projects within the port activities. **The goal** of the work is to develop a risk management model for the implementation of concession projects in the port to improve the efficiency of port activities and ensure the competitiveness of port services. The following **tasks** are solved in the article: analysis of international and national experience in reforming the port industry, consideration of the essence of the project-oriented approach in port management, determination of the relevance of the implementation of public-private partnership projects on the example of concession projects in the port, analysis of risks arising from the project management of ports within the concession, identification of concession project stakeholders, proposal of a classification model for risk distribution among project stakeholders, prioritization of risks based on the probability of their occurrence, identification and significance of negative consequences, development of a risk assessment model for port production in concession projects. The following **methods** are used: project management methods, failure mode and effects analysis method, risk management theory, quality management methods. The following **results** were obtained: based on analytical research of the world and Ukrainian experience in the operation of transport hubs, it was proved that an effective mechanism for increasing the competitiveness of ports is the implementation of reform principles based on project management methodology. It has been established that the most common type of port activity improvement is the implementation of concession projects. It is noted that in the process of managing a concession project, certain risks arise that require assessment. The stakeholders of the concession project are identified and a classification model for the distribution of risks between them is proposed. A model of risk-based port management in concession projects has been developed based on the failure mode and effects analysis method taking into account the determination of the risk priority rank. **Conclusions.** To increase the competitiveness of ports, it is proposed to develop and implement concession projects in port activities based on the project management methodology, the implementation of which can increase the efficiency of port services. There are risks in the management of port activities within a concession project. It is proposed to distribute them among stakeholders and determine the probabilities of occurrence, identifying risks, assessing the significance of their impact on the quality of port services. Based on the proposed risk assessment model, taking into account the determination of the priority rank, it is shown that the greatest risk is associated with the implementation of customs formalities and the danger of the port water area.

Keywords: port; management; project; concession; risk; competitiveness; stakeholder.

Introduction

The strategic aspect of the country's economic development and the main direction of the dynamic functioning of the state's transport system is the implementation of effective port activities to service foreign trade cargo flows.

To ensure the competitiveness of port services, it is necessary to attract investments to modernize the port infrastructure in order to reduce the time required to handle cargo and vessels.

International experience proves the effectiveness of public-private partnership mechanisms as one of the main areas of improvement of port equipment through the implementation of concession projects in seaports.

The development strategy for Ukrainian seaports also includes attracting investment to prioritize the implementation of concession projects in port operations.

In addition, it is worth noting that the implementation of concession projects is inevitably associated with certain risks. This situation requires the development of a risk management system that will allow identifying certain bifurcation points of the port development investment project, which will be used to track project flexibility and timely effective management decisions.

This area of state transport policy also requires a change in the concepts of managing the system of interaction between concession participants through the use of structured methodological principles of project risk-oriented management.

Analysis of recent research and publications

If we consider the essence of public-private partnership, it is noted in [1] that it is a balanced system of economic and legal relations between public and

private partners based on the principles of equality, benefit and risk sharing and created to implement strategically important seaport development projects.

The concept of concession can be defined as a model for creating or modernizing certain facilities. In the case of a seaport, concession projects perform the function of purchasing new equipment, improving port infrastructure and operational characteristics at the expense of a private investor [2].

The vast majority of global ports operate on the basis of a land concession. In this case, the port authority plays the role of a landlord, which has land within the port's waters at its disposal. Private operators perform stevedoring duties in the port on the lands and berths obtained under a concession for up to 40 years with the right to extend it [3].

The advantages of attracting private investment in port development are a short preparation period and savings of the state budget or state-owned enterprise for the development of a feasibility study for the project. In this case, the average estimated cost of such development at the preliminary stage is approximately \$300 thousand, and at the final stage, including tender support, it is \$1 million [4].

It is also worthwhile to focus on research, in particular [5], related to the information and communication network of critical infrastructure systems, which can be used to improve the efficiency of processing information related to the establishment of interaction between participants in port activities.

The advantages of state participation in the implementation of concession projects are the possibility of attracting small financial organizations – non-bank institutions that provide microcredit. Within the framework of the project, government agencies develop and discuss with stakeholders the terms of reference for the project preparation. The methodology for developing a decision-making system in the project planning process is proposed in the study [6]. In addition, attention is drawn to scientific research on risk-based enterprise management [7–9] and the developed models of project-oriented management of the modernization of organizations to ensure their investment attractiveness and competitiveness [10, 11]. The concepts of competitiveness and efficient operation of enterprises in the context of sustainable development are considered in [12–14].

The method of managing scenarios for the implementation of a complex infrastructure development project, which can be used to introduce mechanisms

for reforming the port, is presented in [15]. A hybrid method for managing project-oriented organizations is proposed in [16]. Actual models for managing the competencies of stakeholders in investment development projects in the context of digital transformation are presented in [17–19].

Given the analysis, it can be argued that the issues of port concession project management have not been sufficiently studied. Therefore, there is a need to develop scientifically based risk management mechanisms for the implementation of concession projects and a model for risk allocation among stakeholders. This is necessary to form a clear system of interaction between concession project participants and to develop mechanisms to prevent and eliminate risks that negatively affect the port's competitiveness.

The purpose of the article is to develop a model of risk management in the process of implementing concession projects in the port to improve the efficiency of port operations and ensure the competitiveness of port services.

Presentation of the main material

An analysis of international experience in port management suggests that the implementation of concession projects creates a system of interaction between the state and business, while maintaining state control over port activities and ensuring the port's competitiveness by attracting investment in port infrastructure development.

The mechanisms of port management in the leading countries of the world prove the need to attract capital from private investors, which will allow to accelerate cargo handling through the modernization or purchase of advanced port mechanized equipment, allocation of funds for the expansion of warehouse facilities or the creation of new container terminals, depending on the specifics of a particular port (Table 1) [20].

Let's analyze the forms of port management shown in Table 1. It should be noted that:

- Port Authority – provides for the organization of port activities using funds earned by the port;
- State – provides for the financing of port activities at the expense of the state budget;
- Public – funding is provided by regional and municipal governments;
- Private – the costs of port operation are covered by private entrepreneurs;

– Concession – the costs of port operations are borne by private companies that have signed a concession agreement and are implementing a concession project in the port.

Table 1. Analysis of the international port infrastructure management system [20]

№	Country	Port	Port infrastructure	Port water area infrastructure
1	Argentina	Buenos Aires	Port Authority + Private	Port Authority + Private
2	Belgium	Antwerpen	Public + Private	State
3	United Kingdom	Dover	Port Authority + Concession	Port Authority
4	Venezuela	Guanta	Port Authority + Private	Port Authority
5	Greece	Piraeus	Port Authority + Public+ Concession	State
6	Denmark	Copenhagen	Port Authority + Private	Port Authority
7	Ireland	Dublin	Port Authority + Concession	Port Authority
8	Spain	Barcelona	Port Authority + Concession	Port Authority
9	Italy	Genoa	Port Authority + Public + Concession	State + Port Authority
10	Cyprus	Limassol	Port Authority + Concession	Port Authority
11	China	Hong Kong	Private	Port Authority
12	Malta	Valetta	Port Authority + Concession	State
13	Mexico	Tampico	Port Authority + Private	Port Authority
14	Netherlands	Rotterdam	Port Authority + Private	State
15	Germany	Hamburg	Public + Private	State
16	Portugal	Porto	Port Authority + Concession	Port Authority
17	Finland	Hanko	Port Authority + Private	Port Authority
18	France	Dunkirk	Port Authority + Public + Concession	State + Port Authority
19	Sweden	Stockholm	Port Authority + Concession	Port Authority

The analysis of the information presented in Table 1 confirms the existence of a developed port management network due to the implementation of concession projects. Out of the 19 ports listed, almost half of them provide for the organization of port activities within the framework of concession projects.

There are important elements and indicators of port management that affect the competitiveness of cargo and ship handling services [21] (Fig. 1), in particular, within the framework of concession projects in ports.

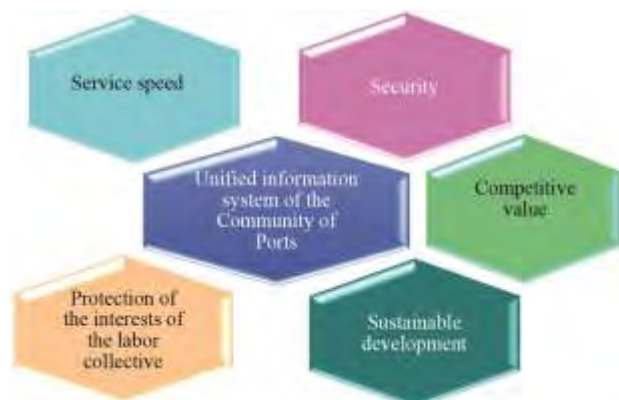


Fig. 1. Components of a competitive port

With regard to the constituent elements of a competitive port, it is worth noting that one of the

most important is the indicator of security both on the territory of the port and in its waters. It is this indicator that is of fundamental importance for the smooth operation of the port, the reliability of service provision, ensuring proper working conditions for the workforce, as well as meeting the conditions for cargo storage and ship handling. When looking at this indicator in detail, special attention should be paid to the safe operation of maritime infrastructure and the proper performance of port service providers, whose efficiency is crucial for the safe arrival, departure and handling of ships in the port. With regard to loading and unloading operations, it is important to qualify stevedores and operators, who must be specialists in working with modern port mechanization equipment. The processes related to compliance with the rules for handling and storing dangerous goods are also of paramount importance in the port's operation, including the prevention of environmental pollution.

Thus, the following risks arise:

- improper performance of port service providers (risk of delay in vessel or cargo handling);
- insufficient qualification of port personnel (risk of damage to port equipment);
- non-compliance with the rules for the storage and handling of dangerous goods (environmental risk

of pollution of the port water area or territory and surrounding areas);

- hazards of the port infrastructure (risk of injury to port workers);
- hazards of the port area (risks of damage to vessels, loss of cargo, accidents).

The competitiveness of the port is primarily ensured by the efficiency of the services provided in the port [22]. The level of their provision must meet international standards, fully satisfying the needs of customers. An important factor is the procedure for setting prices for certain port services and determining the productivity indicator that will ensure adequate handling of the existing cargo flow. In the case of a concession project with a single port operator, it is advisable to discuss and establish a certain set of parameters that will affect pricing. In this case, the port should constantly review this component, thus ensuring an effective balance between quality and cost characteristics. In this situation, we can identify:

- risk of customer dissatisfaction (risk of poor quality port services);
- risk of uncompetitive prices for port services (risk of inefficient pricing).

As for the speed of cargo and vehicle handling, it also plays an important role in the system of providing efficient port services. This indicator is influenced by the timeliness of various types of state control, including customs and border control. It also takes into account the time required to complete various formalities related to cargo certification and the preparation of the necessary documents for both export cargo and import cargo intended for free circulation in Ukraine. The speed of these procedures most often depends on two parties – the cargo owner (or his representatives, in particular, an employee of a freight forwarding company, customs broker) and the government authority that performs formalities to control the movement of goods and vehicles across the customs border of Ukraine. It is the level of qualification of the freight forwarder and customs broker that affects the timeframe for cargo clearance and its subsequent passage across the border, in particular to the port. Therefore, we can assert that there are risks in this situation:

- incorrect execution of cargo documents;
- late payment of customs duties;
- unreasonable detailed customs control (detailed inspection) of cargo.

If we continue this thesis and focus on the speed of service, one of the main factors that affects this indicator

and can be identified is the availability of the Unified Port Community Information System. It is this system, in particular in the process of implementing a concession project in a port, that can establish a stable connection between all participants in the cargo delivery system – the shipper, the consignee, state control authorities, the administration of ports and transport hubs on other modes of transport (rail, various intermediaries and representatives of the client – freight forwarders, agents, customs brokers, stevedores, talmans, warehouse and terminal workers, carriers, surveyors, insurance companies, and banking institutions. The availability of the aforementioned System will help to reduce the risks of:

- untimely delivery of goods;
- inconsistency of the participants in the cargo handling process and vehicles (vessel, wagon, car).

Taking into account the concept of sustainable development of society, in the process of implementing concession projects in ports, it is necessary to adhere to the established goals approved at the international level for the activities of enterprises. First of all, it is about ensuring the following principles:

- energy efficiency of port operation;
- decent work for port workers and economic growth of the enterprise, region, and the state as a whole
- safe operation of port infrastructure facilities through timely modernization, repair, and replacement of port equipment, taking into account the best innovative practices of the port industry;
- sustainable development of cities and communities adjacent to the port by creating new jobs and financing the development of infrastructure projects of local communities;
- preservation of marine resources by preventing pollution of the port area.

Failure to comply with these principles may result in the following risks

- insufficient energy efficiency of the port;
- unsafe working conditions for port employees;
- unsafe operation of port equipment;
- lack of involvement of advanced technologies and science-intensive solutions in the implementation of port investment development projects;
- insufficient participation in development projects of the communities and territories adjacent to the port;
- pollution of the port's sea area.

Another element of effective management of a port development project is to protect the interests of the labor collective by introducing incentive programs for the best employees, improving working conditions and paying

decent remuneration for the work performed. In this case, we can consider only one risk associated with the presence of an irresponsible employer, which is improper incentives for the labor collective.

Summarizing the above, we emphasize that in the process of implementing a concession project in a port, it is necessary to take into account the above risks associated with the activities of both a private investor and public authorities and other entities actively involved in port investment development projects. And it is precisely under the condition of the above factors, as well as effective investment support for business structures, that it is possible to ensure the competitiveness of port services and increase the volume of cargo flows that will pass through transport hubs.

Let's focus on the organizational aspects of project management of ports under concession, which are approved in Ukraine. In order to become a participant in the tender, which is a prerequisite for the implementation of a concession project in a port, a private business entity must file an official application with the Ministry of Community, Territorial and Infrastructure Development of Ukraine regarding its intention to develop a feasibility study for the project. This document contains information on the terms of the feasibility study and information on the organization that will develop the document. The next step is to conclude an agreement on non-disclosure of confidential information, as well as to provide information about the facility to the company that will develop the feasibility study. This is followed by the process of drafting the document and submitting it to the Ministry of Community, Territorial and Infrastructure Development of Ukraine.

Concession projects in Ukraine are implemented under the "build-operate-transfer" scheme, which is the most common in the world. The European experience of port management proves the existence of other forms of concession, the characteristics of which are shown in Fig. 2 [23].

Ukraine is currently implementing concession projects in the ports of Olvia and Kherson. According to the concession agreements, *QTerminals Olvia* will invest UAH 3.4 billion in the development of Olvia port (UAH 80 million for the development of Mykolaiv infrastructure) and *Risoil-Kherson* invested UAH 300 million in the development of the Kherson port (UAH 18 million for the development of the Kherson city infrastructure).

For Kherson, the plan was primarily to modernize port equipment, mechanize warehouses, and increase the capacity of areas for simultaneous storage of grain cargo by installing additional silos.

However, martial law in Ukraine slowed down all processes in the ports, which caused risks of violating the main terms of the concession projects prepared for implementation.

However, the current difficult situation in the transportation sector does not stop international transport companies from investing in the development of port infrastructure. This trend will have a positive impact on the economy of our country. In particular, the well-known shipping company Moller-Maersk is interested in implementing a container terminal concession project in the port of Chornomorsk. This will create new jobs in wartime, modernize the port infrastructure in line with modern international standards, and ultimately increase the port's competitiveness by expanding cargo and ship handling capabilities.

Let's identify the risks associated with concession projects in the ports under consideration in the current situation of martial law.

First, there is the risk of a reduction in the level of concession payments. According to the stolen agreements, *QTerminals Olvia* is supposed to pay UAH 80 million to the state budget of Ukraine annually, and the investor *Risoil-Kherson* is supposed to pay at least UAH 12 million, including indexation, and 7% of net income as a concession payment.

Secondly, there is a risk of a decrease in cargo transshipment volumes in ports. According to the terms of the concession projects in the port of Olvia, the investor must ensure a minimum annual cargo handling volume of at least 2.55 million tons, and in the port of Kherson, the volume of cargo handling must be at least 1.36 tons by 2030.

Third, there is a risk of a reduction in infrastructure investments that were planned to be directed to ensure the development of nearby cities. In particular, *QTerminals Olvia* was supposed to invest UAH 80 million in Mykolaiv, and *Risoil-Kherson* was supposed to invest UAH 18 million in Kherson.

Fourthly, there is a risk of disruption of construction and modernization of port infrastructure, in particular, the construction of a grain terminal and a universal transshipment complex has been suspended for the port of Olvia. The modernization of mechanized port equipment and grain storage warehouses has been frozen for the port of Kherson.

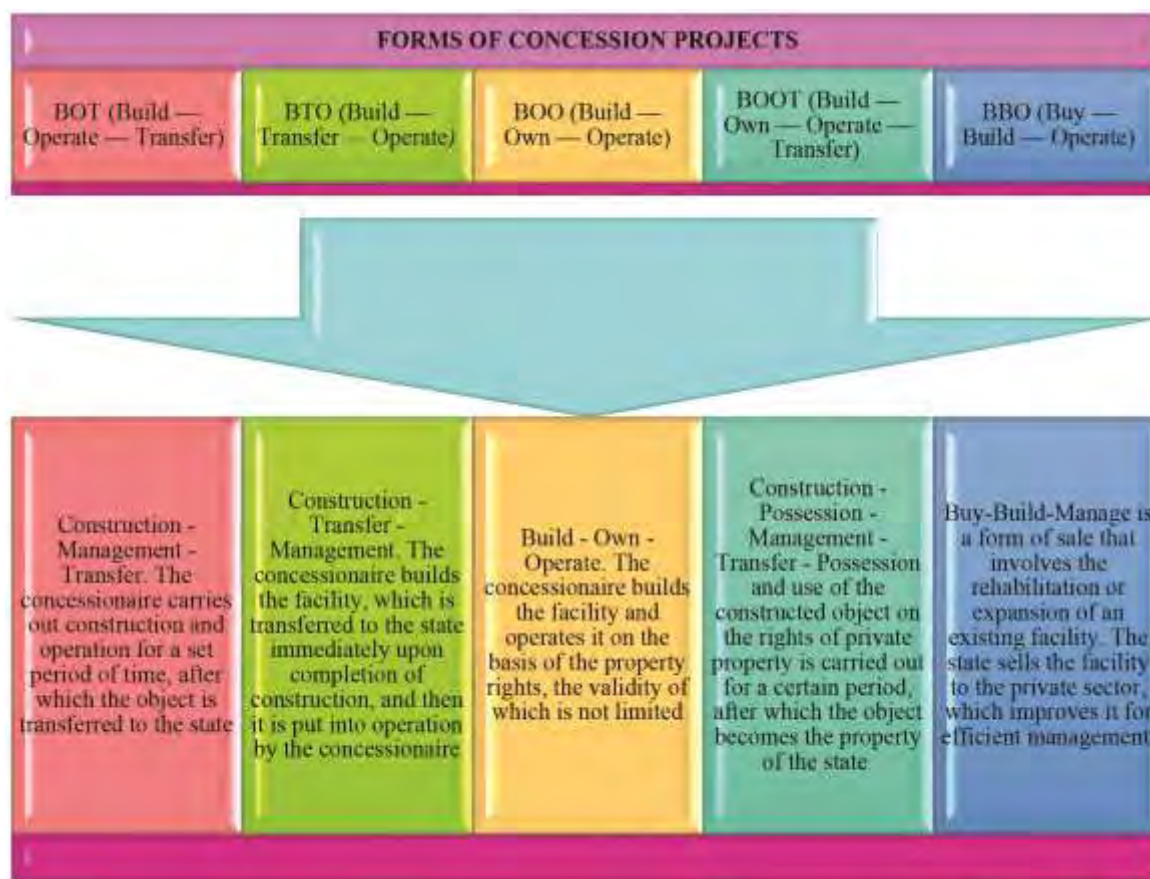


Fig. 2. Forms of concession projects [23]

In addition, the implementation of concession projects in the port also poses a risk of environmental pollution in case of improper loading and unloading operations and handling of ships and cargo, which negatively affects the environment of the region.

Other significant risks that need to be prevented are those related to the activities of the port's labor force. These risks include a decrease in the level of employment at the port and a reduction in wages.

According to the concession project in the port of Olvia, the investor undertook to guarantee the employment of port employees and prevent their dismissal for 6 years, and in the port of Kherson – for 10 years. In this case, there is a financial risk for the port workers associated with the payment of the proper level of wages.

There may also be a legislative risk associated with an imperfect regulatory system for the implementation of concession projects.

Another risk is the time and financial costs of the state. This risk arises due to the long period of preparation of the concession project and the mandatory involvement of an advisor, the cost of which is

approximately UAH 250 million. This risk also interacts with the risk of engaging an incompetent advisor.

The risk of rejection of the private investor's proposals by the state authorities has a significant impact. This may happen if the state transport policy or strategic priorities for port development change.

If the state, in order to attract private investors to implement concession projects in ports, provides insufficient information about port operations or insufficiently uses marketing research resources, there is a risk that stakeholders will not be interested in implementing such projects.

If the financial plan of the project is not approved, there may be a risk of inability to finance the project or the risk of inefficient spending of funds.

During martial law in Ukraine, state budget funds are being redistributed to military needs. At the same time, expenditures, in particular for the development of the port industry, are being reduced. In this situation, there is a risk that there will be no available funds to finance the feasibility study of a concession project in the port. To prevent this risk, international stakeholders are involved, including the Global Infrastructure Facility,

the European Bank for Reconstruction and Development, and the International Finance Corporation.

In order to assess port risks associated with the implementation of concession projects, we propose to use a risk assessment method based on FMEA analysis with the determination of the severity of hazards and analysis of the types and consequences of failures.

This method is used to prioritize the RPN risk, as well as to further calculate the total risk for each stage of port production and identify the most risky stage.

With the help of FMEA analysis in the process of implementing a concession project, the port's activities can be divided into certain stages, assess the severity of the risk consequences and the frequency of its occurrence, identify the cause of the risk, distribute the risk among the concession project stakeholders

(private investor, state, labor collective, third parties – customers, representatives of the cargo owner) and develop effective solutions to eliminate it.

Risk prioritization is carried out on an expert basis. To establish the evaluation criteria for the significance of consequences S, the occurrence of risk O, and the detection of risk D, 12 experts ($K = 7$) were involved. During the expert assessment, the indicators were determined on a 10-point scale (see Table 2) and are presented in Table 3.

The priority risk number RPN is determined based on the product of three evaluation criteria: the significance of the risk consequences, the occurrence of the risk, and the identification of the risk in the process of implementing a concession project in the port.

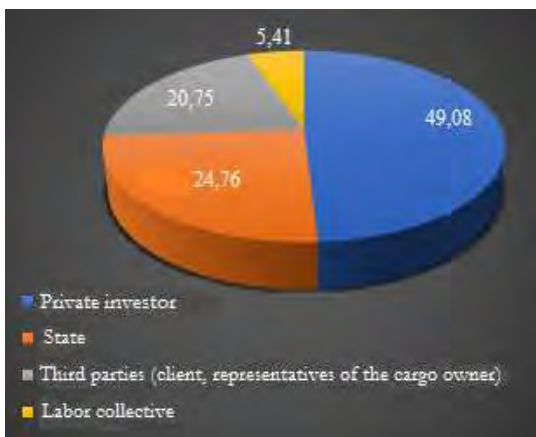
Table 2. Scale for determining indicators for FMEA analysis

Rank	Evaluation criterion significance of consequences, S		Evaluation criterion of risk occurrence, O		Evaluation criterion of risk identification, D			
10	High	The potential risk may cause a threat to the health or life of port workers	Very high	Risk is almost inevitable (more than once a day)	Impossibility to detect	The existence of the risk is not verified and the risk cannot be identified		
9		The potential risk leads to a violation of legal regulations or the safe operation of the port		High			The probability of risk occurrence is similar to the probability of its absence (1 time in 3–4 days)	The risk is unlikely to be detected
8	Medium	The risk leads to a complete loss of quality of port services	Medium		Recurring risks (once a week)	High probability of non-detection	Port service is fully checked for risks	
7		The risk leads to high customer dissatisfaction		Permanent risks (once a month)	There is a possibility of detection			Port service is checked in the process of its provision
6		The risk leads to a significant loss of quality of port services		Frequent risks (1 time per 3–4 months)				
5	Low	The risk leads to a partial loss of quality of port services	Medium	Random risks (1 time per half-year)	Low probability of detection	Port processes are controlled statistically		
4		The risk does not affect the quality of port services, but leads to customer dissatisfaction		Irregular risks (1 time per year)			Medium probability of detection	The port process is statistically evaluated and controlled in the course of port production
3	Low	The risk does not affect the quality of port services, but may be noticed by the concession project stakeholder	Low	Infrequent risks (once every 2–3 years)	High probability of detection	Port process is statistically controlled		
2		The risk has no significant consequences and may not be noticed by the concession project stakeholder		Possible occasional risks (1 time in 4–5 years)			Almost complete detection probability	Port services are checked automatically
1		No significant impact		Unlikely risks (less than 1 time in 5 years)				

Table 3. Classification model for risk assessment of port services in concession projects

	Type of risk	Stakeholder	S	O	D	RPN
1	The risk of violation of the terms of vessel or cargo handling	Private investor	7	7	2	98
2	Environmental risk (the risk of pollution of the water area, port territory and surrounding areas)	Private investor	9	2	7	126
3	Risk of unsafe working conditions for port workers	Private investor	10	3	2	60
4	Risk of damage to vessels	Private investor	6	4	5	120
5	Risk of cargo loss	Private investor	7	5	4	140
6	Risk of customer dissatisfaction	Private investor	5	5	7	175
7	Risk of providing poor quality port services	Private investor	8	4	3	96
8	Risk of inefficient pricing	Private investor	4	3	3	36
9	The risk of inconsistency between participants in the cargo and vehicle handling process	Private investor	7	6	4	168
10	Risk of insufficient energy efficiency of the port	Private investor	3	5	3	45
11	Risk of lack of innovative solutions	Private investor	1	3	2	6
12	Risk of insufficient participation in development projects of the communities and territories adjacent to the port	Private investor	2	2	2	8
13	Risk of inadequate incentives for the labor collective	Private investor	5	2	1	10
14	Risk of danger to the port area	State	9	3	7	189
15	Risk of unreasonable detailed customs control of cargo	State	4	9	10	360
16	Risk of accidents	Third parties	9	4	5	180
17	Risk of incorrect execution of documents for cargo	Third parties	3	7	4	84
18	Risk of untimely payment of customs duties	Third parties	4	7	7	196
19	Risk of insufficient qualification of port personnel	Labor collective	7	4	1	28
20	Risk of damage to port equipment	Labor collective	8	3	3	72
21	Risk of unsafe operation of port equipment	Labor collective	10	1	2	20

The distribution of risks of the concession project stakeholders in the organization of cargo delivery through the port is shown in Fig. 3. This figure shows that the most severe consequences of risks are borne by a private investor, who is one of the participants in the port concession project.

**Fig. 3.** Distribution of risks between stakeholders of the concession project

The average arithmetic score of the priority of the i -th risk is determined as follows:

$$A_i = \frac{RPN_i}{K}, i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

where RPN_i – priority of the i -th risk ($i = 1, \dots, n$);
 K – is the number of experts.

The weighting factor of the i -th risk is determined as follows:

$$\gamma_i = \frac{A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}, i = 1, \dots, n. \quad (2)$$

The results of the calculations are presented in Table 4.

Table 4. The importance of port services risks in concession projects

n	RPN _i	A _i	γ _i
1	98	14	0,044
2	96	13,71	0,043
3	126	18	0,057
4	60	8,57	0,027
5	120	17,14	0,054
6	140	20	0,063
7	175	25	0,079
8	36	5,14	0,016
9	168	24	0,076
10	45	6,43	0,020
11	6	0,86	0,003
12	8	1,14	0,004
13	10	1,43	0,005
14	189	27	0,085
15	360	51,43	0,162
16	180	25,71	0,081
17	84	12	0,038
18	196	28	0,088
19	28	4	0,013
20	72	10,29	0,032
21	20	2,86	0,009

Most of the risks arising in the process of implementing a concession project in a port cause critical and significant consequences that negatively affect the port's operations and reduce its competitiveness.

In particular, the inability to perform loading and unloading operations on time due to the late provision of cargo or a vehicle leads to a delay in cargo delivery. In other words, it is a case of inconsistency between the participants in port production.

If there is a risk of unreasonable customs formalities, the cargo is also delayed. And it is the risk of a detailed inspection of the cargo before it is unloaded from the container that causes a delay in delivery and possible negative consequences for the condition

of the cargo. This can lead to an unreasonable increase in the cost of delivery from the sender to the recipient. The risk of late payment of customs duties prevents customs from releasing imported goods into free circulation in Ukraine, which will also affect the delivery time and, consequently, the client's costs. After the two customs risks related to detailed inspection and payment of customs duties, the risk of danger to the port area is the third highest priority and is currently very significant given the introduction of martial law in Ukraine.

Fig. 4 shows the significance of risks for each stakeholder in the process of providing services in the port during the implementation of the concession project.

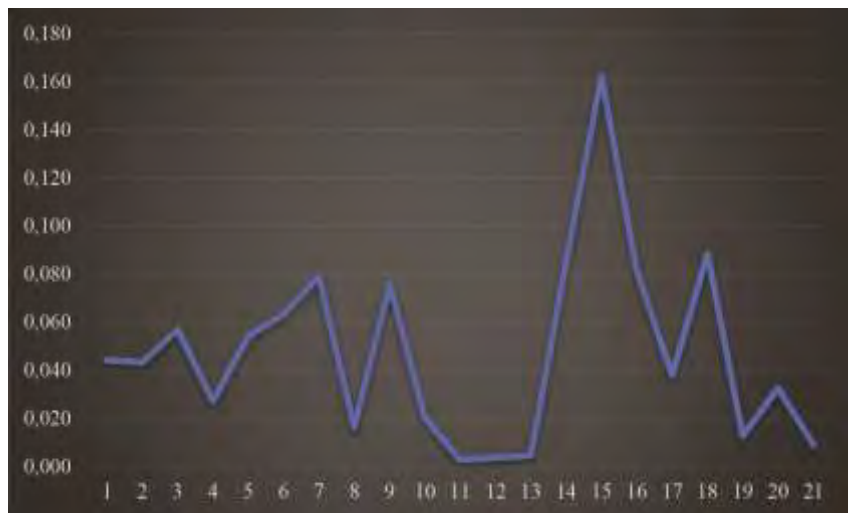


Fig. 4. Significance of risks for concession project stakeholders

The most significant risk for a private investor is the dissatisfaction of customers who receive port services under the concession project. As for the state mechanisms for regulating cargo flows across the customs border, it is the detailed customs inspection that leads to vehicle downtime and cargo delays and, as the analysis shows, is the most significant risk that needs to be mitigated in the first place. With regard to the activities of third parties involved in the port's operations, it is the risk of accidents in the port's waters caused by the carrier that has a significant impact on the port's competitiveness. If we consider the risks of the labor collective, they do not have a significant impact, unlike the risks associated with other stakeholders. However, it is still worth noting the risk of damage to port equipment that may arise due to the lack of qualifications of port workers.

It should be emphasized that it is the consequences of the private investor's risks that prevail over the

severity of the consequences of the risks of public authorities. It should be noted that the high priority of the risk indicates its greatest negative impact on the port's competitiveness and the low probability that the risk will be identified in time during the implementation of the concession project.

Conclusions

The paper shows that the efficiency of foreign trade operations significantly depends on the state of the cargo delivery system. It is established that it is the port, as a transport hub, that provides management of large cargo flows. An important indicator that affects the efficiency of port activities is the competitiveness of port services.

The analysis of the state's strategic initiatives in the transport sector, as well as the study of the functioning of ports at the international and national levels,

has proved the need to use the methodology of project-oriented port management to ensure the sustainable development of the enterprise. One of the mechanisms of such management is the implementation of concession projects.

The study has shown that in the process of developing and implementing concession projects in the port, numerous risks arise that require appropriate decisions to mitigate the negative impact.

To assess risks in the implementation of concession projects, it is proposed to use a risk-based management approach based on FMEA analysis. The paper identifies the stakeholders of the concession project, which include a private investor, government agencies, third parties related to the client (shipper or consignee), and the labor collective.

The author proposes a classification model for distribution of risks between all participants of a concession project in a port and determines the priority

of risks for each stakeholder and for the process of providing port services in general within the framework of a concession project. It is established that a private investor has the most negative consequences of risks when participating in port concession projects. Based on the establishment of evaluation criteria for the occurrence, identification and significance of the consequences of risks, it is concluded that the risks of detailed customs control, late payment of customs duties and the dangers of the port area have a negative impact with the most severe consequences for the competitiveness of port services.

Further research will focus on developing a model for assessing the indicators that affect the competitiveness of the port, as well as creating a conceptual model for assessing the quality of port services in the implementation of concession projects, taking into account the goals of sustainable development and the principles of *Quality 4.0*.

References

1. Vlasova, V. (2016), "Analysis and systematization of methodical approaches to determining the amount of concession payments in seaports" ["Analiz ta systematyzatsiia metodychnykh pidkhodiv do vyznachennia rozmiru kontsesiinykh platezhiv u morskyykh portakh"], *Business Inform*, No. 11, P. 149–155.
2. Shakhov, A., Piterska, V., Botsaniuk, V., Sherstiuk, O. (2020), "Mechanisms for Goal Setting and Risk Management of Concession Projects in Seaports", *IEEE 15th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, P. 185–189, DOI: <https://doi.org/10.1109/CSIT49958.2020.9321963>
3. Shemaev, V., "From Antwerp to Rotterdam: What European experience can give Ukrainian ports" ["Vid Antverpena do Rotterdama: Shcho mozhe daty ukrainskym portam yevropeyskiy dosvid"], available at: https://cfts.org.ua/articles/ot_antverpena_do_rotterdama_cho_mozhet_dat_ukrainskim_portam_evropeyskiy_opyt_1150/87511 (last accessed 27.05.2023)
4. Holodnytskyi, O., "Concession vs privatization, private or state initiative? Talk about PPP in ports at UPF-2021", available at: https://cfts.org.ua/spetsproekty/kontsessiya_vs_privatizatsiya_chastnaya_initsiativa_ili_gosudarstvennaya_razgovor_o_gchp_v_portakh_na_upf_2021 (last accessed 22.05.2023)
5. Kosenko, V., Persyanova, E., Belotskiy, O., Malyeyeva, O. (2017), "Methods of managing traffic distribution in information and communication networks of critical infrastructure systems", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, No. 2 (2), P. 48–55. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.2.048>
6. Kosenko, V. (2018), "Decision support system in planning investment projects", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, No. 4 (6), P. 113–119. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2018.6.113>
7. Kosenko, V. (2017), "Principles and structure of the methodology of risk-adaptive management of parameters of information and telecommunication networks of critical application systems", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, No. 1 (1), P. 46–52. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.1.046>
8. Shakhov, A., Piterska, V., Sherstyuk, O., Botsaniuk, V., Babayev, I. (2021), "Mechanisms for the effective sharing of risks of seaport concession projects", *Proceedings of the 2nd International Workshop IT Project Management (ITPM 2021)*, Slavsko, Ukraine, February 16–18. CEUR Workshop Proceedings, No. 2851, P. 34–44.
9. Shakhov, A., Kyrylova, O., Sagaydak, O., Piterska, V., Sherstiuk, O. (2022), "Conceptual risk-oriented model of goal setting in the implementation of concession projects in seaports", *Proceedings of the 3rd International Workshop IT Project Management (ITPM 2022)*, Kyiv, Ukraine, August 26. CEUR Workshop Proceedings, No. 3295, P. 149–158.
10. Fedorovich, O., Kosenko, V., Lutai, L., Zamirets, I. (2022), "Methods and models of research of investment attractiveness and competitiveness of project-oriented enterprise in the process of creating innovative high-tech", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, No. 3 (21), P. 51–59. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.21.051>

11. Fedorovich, O., Kosenko, V., Pronchakov, Y. (2020), "Management of the modernization of the enterprise developing in the conditions of the short-term prospect", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, 1(11), P. 90–96. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.090>
12. Shakhov, A., Piterska, V., Botsaniuk, V., Sherstiuk, O. (2022), "Competitiveness Assessment of Services in Seaport Concession Projects", *IEEE 17th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, P. 406–409, DOI: <https://doi.org/10.1109/CSIT56902.2022.10000554>
13. Obradović, V., Todorović, M., Bushuyev, S. (2018), "Sustainability and Agility in Project Management: Contradictory or Complementary?", *IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, Nur-Sultan, Kazakhstan, P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/STC-CSIT.2018.8526666>
14. Bushuyev, S., Murzabekova, S., Khusainova, M., Bushuyeva, N. (2022), "Modelling of Breakthrough Competencies for Managing an Innovation Project", *International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)*, P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/SIST54437.2022.9945773>
15. Wiecher, C., Tendyra, P., Wolff, C. (2022), "Scenario-based Requirements Engineering for Complex Smart City Projects", *IEEE European Technology and Engineering Management Summit (E-TEMS)*, Bilbao, Spain, P. 97–102, DOI: <https://doi.org/10.1109/E-TEMS53558.2022.9944441>
16. Domanskyi, V., Wolff, C., Sachenko, A., Badasian, A. (2021), "A Hybrid Method for Managing Agile Team in a Distributed Environment", *11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, Cracow, Poland, P. 247–251, DOI: <https://doi.org/10.1109/IDAACS53288.2021.9660882>
17. Mikhridinova, N., Wolff, C., Hussein, B. (2021), "Competences Management for the Digital Transformation: Development of an Assessment Method", *11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, Cracow, Poland, P. 1190–1194, DOI: <https://doi.org/10.1109/IDAACS53288.2021.9660974>
18. Wolff, C., Omar, A., Shildibekov, Y. (2019), "How will we Build Competences for Managing the Digital Transformation?", *10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, Metz, France, P. 1122–1129, DOI: <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2019.8924432>
19. Mikhridinova, N., Wolff, C., Hussein, B. (2019), "Data Acquisition Framework For Competence Profiles Selection and Project Staffing", *10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, Metz, France, P. 835–838, DOI: <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2019.8924379>
20. Maltseva, A., "How to get ports for pennies" ["Yak otrymaty porty za kopiyki"], available at: <https://www.epravda.com.ua/rus/publications/2012/10/23/340788/> (last accessed 22.05.2023)
21. Hacks, O., "Infrastructure breakthrough: how to create a world-class port" ["Infrastrukturnyi proriv: yak stvority port svitovoho rivnia"], available at: https://biz.ligazakon.net/analitycs/202368_nfrastrukturniy-proriv-yak-stvoriti-port-svtovogo-rvnya (last accessed 27.05.2023)
22. Shakhov, A., Piterska, V., Sherstiuk, O., Botsaniuk, V. (2020), "Mechanisms for risk-oriented management of concession projects in seaports", *Transport Development*, No. 1(6), P. 30–39. <https://doi.org/10.33082/td.2020.1-6.03>
23. "Concession" ["Kontsesiia"], available at: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D1%86%D0%B5%D1%81%D1%96%D1%8F> (last accessed 27.05.2023)

Received 20.05.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Пітерська Варвара Михайлівна – доктор технічних наук, професор, Одеський національний морський університет, професор кафедри експлуатації портів і технології вантажних робіт, Одеса, Україна; e-mail: varuwa@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5849-9033>

Самойловська Валентина Петрівна – кандидат економічних наук, доцент, Одеський національний морський університет, доцент кафедри менеджменту і маркетингу, Одеса, Україна; e-mail: vpsam@ukr.net; ORCID ID: 0000-0002-3774-6389

Шахов Валентин Іванович – Одеський національний морський університет, старший викладач кафедри технічного обслуговування та ремонту суден, Одеса, Україна; e-mail: vishakhov42@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3435-8532>

Hiroshi Tanaka – Dr, Professor, Tokyo University of Science and Innovation, Japan; e-mail: hirojpmf@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2631-721X>

Piterska Varvara – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Odesa National Maritime University, Professor at the Department of Port Operation and Cargo Handling Technology, Odesa, Ukraine.

Samoilovska Valentina – PhD (Economics Sciences), Associated Professor, Odesa National Maritime University, Associated Professor at the Department of Management and Marketing, Odesa, Ukraine.

Shakhov Valentin – Odesa National Maritime University, Senior Lecturer at the Department of Technical Maintenance and Repair of Ships, Odesa, Ukraine.

Hiroshi Tanaka – Dr, Professor, Tokyo University of Science and Innovation, Japan.

РИЗИКО-ОРІЄНТОВАНЕ УПРАВЛІННЯ ПОРТАМИ В ПРОЦЕСІ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЄКТІВ КОНЦЕСІЇ

Предметом дослідження в статті є моделі й методи управління ризиками під час реалізації концесійних проєктів у межах портової діяльності. **Мета роботи** – розробити модель управління ризиками в процесі реалізації проєктів концесії для підвищення ефективності портової діяльності та забезпечення конкурентоспроможності надання портових послуг. У статті вирішуються такі **завдання**: аналіз міжнародного та національного досвіду реформування портової галузі; розгляд сутності проєктно-орієнтованого підходу в управлінні портом; визначення актуальності реалізації проєктів державно-приватного партнерства на прикладі проєктів концесії в порту; аналіз ризиків, що виникають у процесі проєктного управління портами в межах концесії; ідентифікація стейкхолдерів концесійного проєкту; створення класифікаційної моделі розподілу ризиків між стейкхолдерами проєкту; визначення пріоритетності ризиків на основі оцінних критеріїв їх виникнення, виявлення значущості негативних наслідків; розроблення моделі оцінювання ризиків портового виробництва в межах реалізації проєктів концесії. Використовуються такі **методи**: управління проєктами, аналіз причин і наслідків відмов, управління якістю, теорія управління ризиками. Здобуто такі **результати**. На основі проведення аналітичних досліджень світового й українського досвіду функціонування транспортних вузлів доведено, що ефективним механізмом підвищення конкурентоспроможності портів є реалізація принципів реформування на основі методології управління проєктами. Установлено, що найбільш поширеним видом покращення портової діяльності є реалізація проєктів концесії. Визначено, що в процесі управління концесійним проєктом виникають певні ризики, які потребують оцінки. Ідентифіковано стейкхолдери концесійного проєкту й запропоновано класифікаційну модель розподілу ризиків між ними. Розроблено модель ризико-орієнтованого управління портом у проєктах концесії на основі методу аналізу причин і відмов з урахуванням визначення рангу пріоритетності ризиків. **Висновки**. Для підвищення конкурентоспроможності портів на основі методології управління проєктами пропонується розробляти та впроваджувати в портову діяльність концесійні проєкти, реалізація яких здатна підвищити ефективність портових послуг. В управлінні портовою діяльністю в межах концесійного проєкту з'являються ризики, що запропоновано розподілити між стейкхолдерами та з'ясувати ймовірності виникнення, виявлення ризиків, оцінити значущість їх впливу на якість надання портових послуг. На основі запропонованої моделі оцінювання ризиків у процесі визначення рангу пріоритетності показано, що ризик, пов'язаний із виконанням митних формальностей, і ризик небезпеки акваторії порту мають найтяжчі та найсерйозніші наслідки для системи оброблення вантажів у порту.

Ключові слова: порт; управління; проєкт; концесія; ризик; конкурентоспроможність; стейкхолдер.

Бібліографічні опису / Bibliographic descriptions

Пітерська В. М., Самойловська В. П., Шахов В. І., Hiroshi Tanaka. Ризико-орієнтоване управління портами в процесі реалізації проєктів концесії. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 2 (24). С. 200–211. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.200>

Piterska, V., Samoilovska, V., Shakhov, V., Hiroshi Tanaka (2023), "Risk-oriented management of ports in the implementation of concession projects", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (24), P. 200–211. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.200>

S. RUSANOVA

AUTOMATED PROJECT MANAGEMENT SYSTEM IN TRANSPORT LOGISTICS

Part 2. Planning and managing a logistics center project in Project Management

The article is a continuation of regular research on project management based on efficient transportation. **The purpose of the work** is to improve the efficiency of management decision-making in the implementation of projects in transport logistics through the use of automated planning and analysis systems. **The object of study** is the process of forming organizational support for project management in transport logistics using automated planning and analysis systems for project efficiency. **The subject of the study** is the practical tools for organizational support of project management in transport logistics using automated systems for planning and analyzing project performance. **Methods.** In the course of the study, a systematic approach was implemented, general scientific methods were used, including logical analysis, synthesis, induction, deduction, analogy, and modeling. The theoretical and methodological basis of the study is the fundamental provisions of project management, management efficiency theory, scientific works of domestic and foreign scientists on project management at the micro, meso, and macro levels. Given the purpose of the work, several **tasks** were set and solved, in particular, the applied imperatives of resource and budget planning were outlined on the example of a logistics center based on the Odesa seaport and the project implementation was monitored in *Microsoft Project*. In terms of resource and budget planning, the expediency of using the method and indicators of the volume utilized is proved. The actual progress of the project against the planned indicators is analyzed. A new project was created using the *Microsoft Project* software and data entry method. In terms of monitoring, conclusions were drawn on the course of events in the project implementation and the status of implementation by individual types of work was clearly shown. All this made it possible to achieve concrete **results**. In terms of resource and budget planning, it was determined to what extent there is a deviation from the planned project implementation timeframe. In terms of monitoring, the need to optimize staffing, budget, and time parameters was identified. The essence of this optimization boils down to the decision to attract additional labor resources with the corresponding cost of work per hour. This made it possible to get rid of the conflict and obtain positive dynamics in the project implementation, as evidenced by the date of its completion, which remained unchanged after the resources were equalized. The need to continue the study and focus on project risk management is outlined.

Keywords: project; project planning; project implementation; project management; port logistics; transport logistics; logistics center.

Introduction

Today, project activities are often carried out in unstable, unpredictable conditions, when the external environment is characterized by increased uncertainty, and customer requirements are unclear and highly dynamic. As a result, there is a growing need for flexible project management. Ukraine's post-war recovery will be characterized by many positive and negative aspects. The key challenge of this period will be financing infrastructure restoration projects, including port infrastructure. Despite the fact that European countries are committed to providing assistance, our country faces acute problems of budget control, investment revenues, project implementation time, etc. Thus, according to the information portal Slovo i Dilo, three countries will take over the patronage of the Luhansk region at once: the Czech Republic, Sweden, and Finland. The United States and Turkey will help rebuild Kharkiv, and

Greece will help rebuild Mariupol and Odesa. Denmark has pledged to restore civilian infrastructure in Mykolaiv [1]. However, the restoration of ports and industrial infrastructure will be carried out according to a completely different mechanism, which is being developed by practitioners from many countries and different industries. A key factor in successfully attracting investment in this context is the transparency of the use of funds. The success of this condition is possible through the use of automated systems for planning and analyzing project performance, which proves the relevance and timeliness of the research results submitted for review.

Analysis of current publications

The theoretical, methodological and applied basis of the results obtained was the research of foreign experts of different periods and scientific fields.

Thus, on the basis of the publications of V. Rach, O. Medvedeva, Y. Zhuk [2], N. Bushuyeva [3], T. Andreeva, T. Petrovska, T. Tytar [4],

V. Beskorovainyi, L. Kolesnyk, D. Yevstrat [5], D. Lytvynenko, O. Maleeva [6, pp. 44–51] structured the procedure for project planning and management. The works of E. Boichenko and N. Vasylchuk [7, p. 25–32] became the basis for the formation of initial monitoring imperatives in general and the selection of monitoring indicators in particular. Thanks to the research of R. Bowen, J. Turner, A. Vasilevska [8–10], practical calculations were made in the Microsoft Project software package, as well as its various modifications [11, 16, 17]. The key ideas on the use of Project Management in logistics were based on the research of I. Koblyanska, E. Mishenin, V. Medvid, Y. Maistrenko [12]. The idea of risk assessment using Project Management is based on the principles of analyzing digitalization works, in particular by the following authors:

O. Polishchuk, T. Kulinich, N. Martynovych, Y. Popova [13]. Despite the sufficiency and completeness of the research, the period in which Ukraine is currently experiencing has exceptional characteristics that cannot be compared with those that were previously experienced, either in terms of the country's internal development or foreign policy. Therefore, there is now a need to develop organizational support for project management in transport logistics based on the use of automated project planning and performance

analysis systems for the purpose of its further massive implementation in practice, both at the micro, meso, and macro levels.

The purpose of the study is to increase the efficiency of management decision-making in the process of implementing projects in transport logistics through the use of automated planning and analysis systems.

Materials and methods

The information base of the study was the publications of domestic and foreign authors.

The research process implemented a systematic approach and used general scientific methods such as logical analysis, synthesis, induction, deduction, analogy, and modeling. Data processing was carried out using the *Microsoft Office* suite of applications, in particular, the *Microsoft Excel* spreadsheet, the *Microsoft Word* text editor, and *Microsoft Project*.

Study results and discussion

It should be noted that this article is a continuation of a study the results of which are reflected in other publications, in particular in [14]. According to the theory presented in [15, pp. 8–11], the basic structure of a project consists of several stages (Fig. 1), with four of the five stages being planning and one being management.

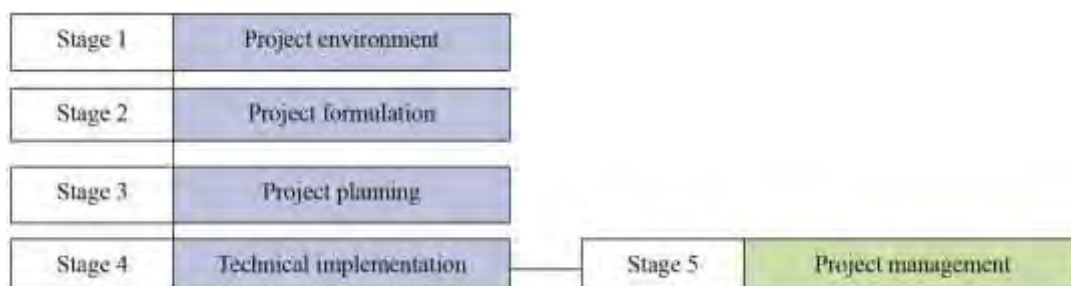


Fig. 1. Project planning and management process. *Source: compiled by the author based on [15]*

Given the topic of the article, let's take a closer look at resource and budget planning on the example of creating a logistics center on the basis of the Odesa seaport. The project management of a logistics center (hereinafter referred to as LC) involves monitoring the implementation of the project in accordance with the plan. This control is carried out on the basis of the events obtained as a result of monitoring, which makes it possible to predict possible changes and contributes to the

development of scientifically sound recommendations. The latter become the basis for substantiating appropriate management decisions in the early stages of problematic processes or phenomena in order to prevent, overcome, or neutralize their impact [7, p. 28]. Monitoring of the implementation of the LC project should be carried out after a certain period of time. Taking into account the war in Ukraine, which is a key risk factor, we believe that it is advisable to monitor it on a monthly basis.

That is why we set this time interval in *Microsoft Project*. This ultimately made it possible to establish that almost all resources (time, human, financial) in the LC project are overloaded. This creates the preconditions for optimizing resources and tasks.

It is worth noting that the most common universal tool for determining deviations in any project is the completed scope method (hereinafter referred to as CS) [3]. This method involves drawing up a full

description of the project and a detailed schedule of its implementation at the initial stage, which was done by the author of the article. The advantage of the delivered scope method is that it provides accurate and reliable information on the progress of the project already at the 15% stage of implementation, i.e. at the beginning [3]. Thus, the monitoring of the implementation of the LC project using the actual volume method was based on the following indicators (Fig. 2).

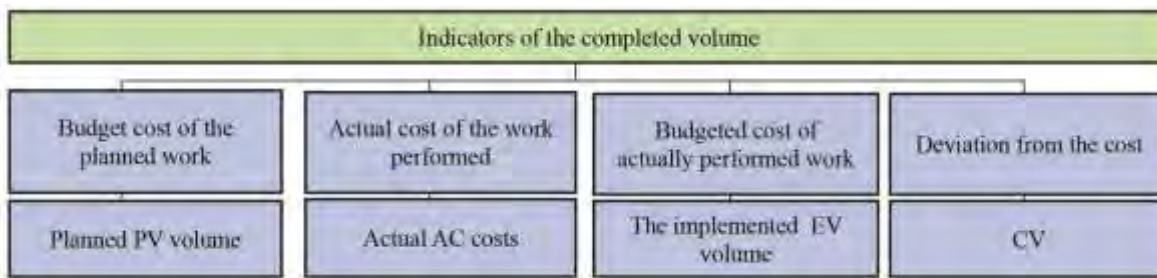


Fig. 2. Indicators of the completed volume method. Source: compiled by the author based on [3]

The planned (budgeted) cost of the planned work, or planned scope, is the sum of the planned budgeted costs of the work to be performed under the project on a certain date under consideration. It is calculated based on the project plan. The actual cost of work performed, or actual costs, is calculated as the sum of the actual costs of the project as of the date under consideration, based on accounting documents. The budgeted cost of work actually performed, or the completed volume, is calculated as the sum of the budgeted costs of all work actually performed on the project as of the date under review, based on actual project status reports.

The cost deviation is calculated using the formula $CV=EV-AC$ and shows in monetary terms how much more resources were spent on the work already completed compared to what was planned [3]. In our case, we used the completed volume method to analyze the actual status of the LC project. To conduct monitoring using the completed volume method, we analyzed the actual progress of the project against the planned indicators and identified deviations (Table 1; Figs. 2, 3).

As can be seen from the figure (Fig. 4), to submit monitoring with tracking, you need to set the monitoring date. In our project, it is 05.12.2023. Thanks to the tracking, you can find out how much the project deviates from the planned project implementation time. Such a measure is necessary because the process of implementing a LC project is influenced by many factors, the dominant of which is the war and

its consequences, which cause risks and ultimately advance or delay in the implementation period, shortage or surplus of project resources, etc.

After monitoring the implementation of the LC project by individual types of work, the results of which are shown in Figs. 5 and 6, we establish the real state of the LC project as of the monitoring date by comparing the actual indicators for individual types of work with the planned ones. Let's consider the actual data on the work of the project A (Fig. 5).

Considering the figure, it should be noted that the blue line reflects the actual status of the work according to the calendar – the start date is 05.11.2023, the end date is 09.11.2023. In this case, the blue line does not differ from the gray line in length, which indicates that there is no deviation from both the planned and actual dates. The work lasted five days as planned, so it was completed on time. Similarly, we analyzed the performance of works B, C...K (Fig. 6).

The analysis of the results obtained during the execution of the works made it possible to establish that the start and end dates for almost all works coincide, which indicates that the tasks for the development of resources were completed on time. The actual duration of two days, 100%, indicates that the work was completed on time. However, there is a deviation from the planned results for work K. The results shown in Figure 6 confirm that the work is only 20% complete. According to the current data, these works started on 11/12/2023 and should be completed on 11/29/2023.

Since the monitoring date is 05.12.2023, it can be stated that the works are being performed with a delay of 11 days. Thus, timely tracking of resource deviations allows timely and informed management decisions to be made. In addition, the results of monitoring project

implementation deviations make it possible to forecast information on such indicators as the time and cost of the project. For this purpose, as already mentioned, we used the method of the completed volume and calculated the indicators (Table 2).

Table 1. Results of monitoring project implementation deviations*

Task	Dev. beginning, days	Dev. finish, days	Dev. duration, days	Dev. value, ₴	Balance of expenses, ₴	Dev. of labor costs, h	Balance of labor costs, h
Start	0	0	0	0,00	0,00	0	0
P3.0	0	3	3	3 840,00	148 720,00	32	1 153,6
P3.1	0	4	4	3 840,00	24 320,00	32	160
P3.1.1	0	4	4	3 840,00	0,00	32	0
A	0	3	3	2 400,00	0,00	24	0
B	3	3	0	0,00	0,00	0	0
C	3	4	1	1 440,00	0,00	8	0
P3.1.2	4	4	0	0,00	14 080,00	0	80
D	4	4	0	0,00	5 120,00	0	32
E	4	4	0	0,00	5 760,00	0	32
F	4	4	0	0,00	3 200,00	0	16
P3.1.3	4	4	0	0,00	10 240,00	0	80
G	4	4	0	0,00	2 560,00	0	16
H	4	4	0	0,00	3 840,00	0	32
I	4	4	0	0,00	3 840,00	0	32
P3.2	3	3	0	0,00	39 840,00	0	265,6
P3.2.1	3	3	0	0,00	19 040,00	0	153,6
J	3	3	0	0,00	8 960,00	0	89,6
K	3	3	0	0,00	7 680,00	0 ч	48
L	3	3	0	0,00	2 400,00	0 ч	16
P3.2.2	3	3	0	0,00	20 800,00	0	112
M	3	3	0	0,00	16 000,00	0	80
N	3	3	0	0,00	4 800,00	0	32
P3.3	4	3	-1	0,00	50 400,00	0	448
P3.3.1	4	3	-1	0,00	36 960,00	0	336
O	3	3	0	0,00	10 080,00	0	112
P	3	3	0	0,00	13 440,00	0	112
Q	3	3	0	0,00	6 720,00	0	56
R	4	4	0	0,00	6 720,00	0	56
P3.3.2	4	4	0	0,00	13 440,00	0	112
S	4	4	0	0,00	6 720,00	0	56
T	4	4	0	0,00	6 720,00	0	56
P3.4	3	3	0	0,00	34 160,00	0	280
P3.4.1	3	3	0	0,00	20 560,00	0	136
U	3	3	0	0,00	1 920,00	0	16
V	3	3	0	0,00	8 960,00	0	56
W	3	3	0	0,00	1 280,00	0	8
X	3	3	0	0,00	8 400,00	0	56
P3.4.2	3	3	0	0,00	11 520,00	0	128
Y	3	3	0	0,00	2 560,00	0	16
Z	3	3	0	0,00	8 960,00	0	112
P3.4.3	3	3	0	0,00	2 080,00	0	16
İ	3	3	0	0,00	800,00	0	8
Ь	3	3	0	0,00	1 280,00	0	8
Finish	3	3	0	0,00	0,00	0	0

*The following table was created in the program package MS Excel

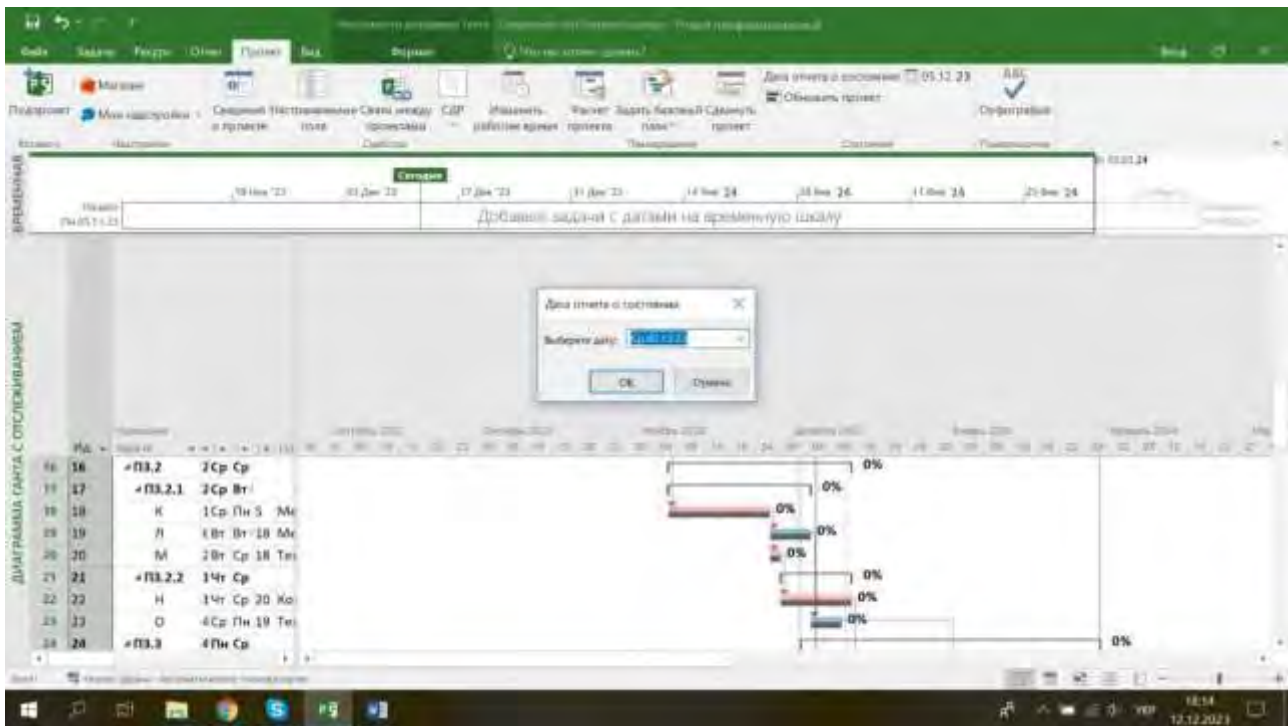


Fig. 3. Monitoring with project tracking of the *Microsoft Project* LC creation

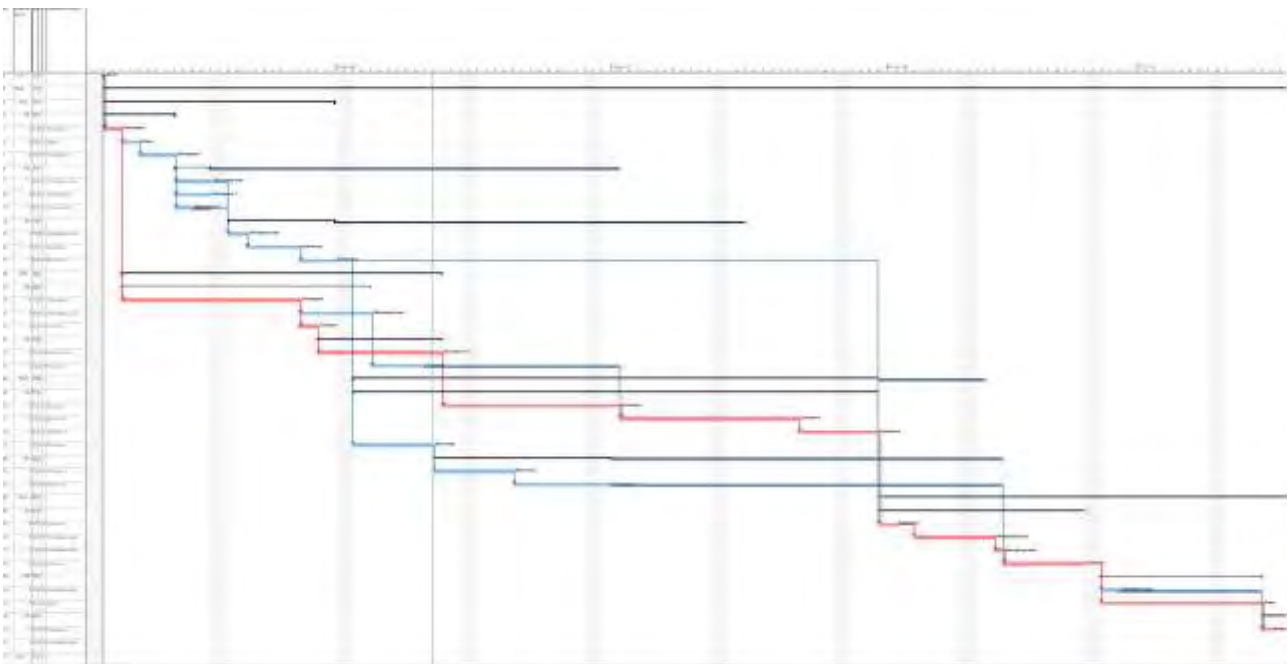


Fig. 4. Basic (initial) project plan for the creation of a *Microsoft Project* LC

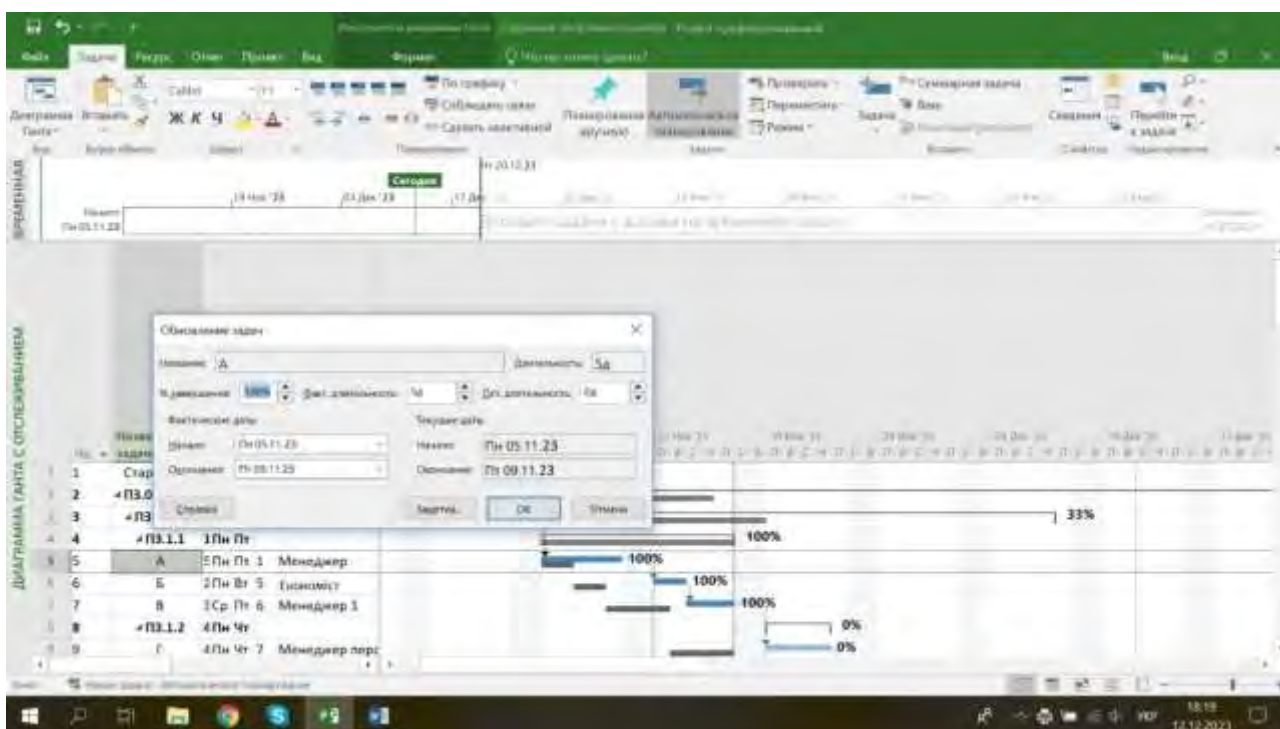


Fig. 5. Monitoring of the implementation of the project to create the LC for A work

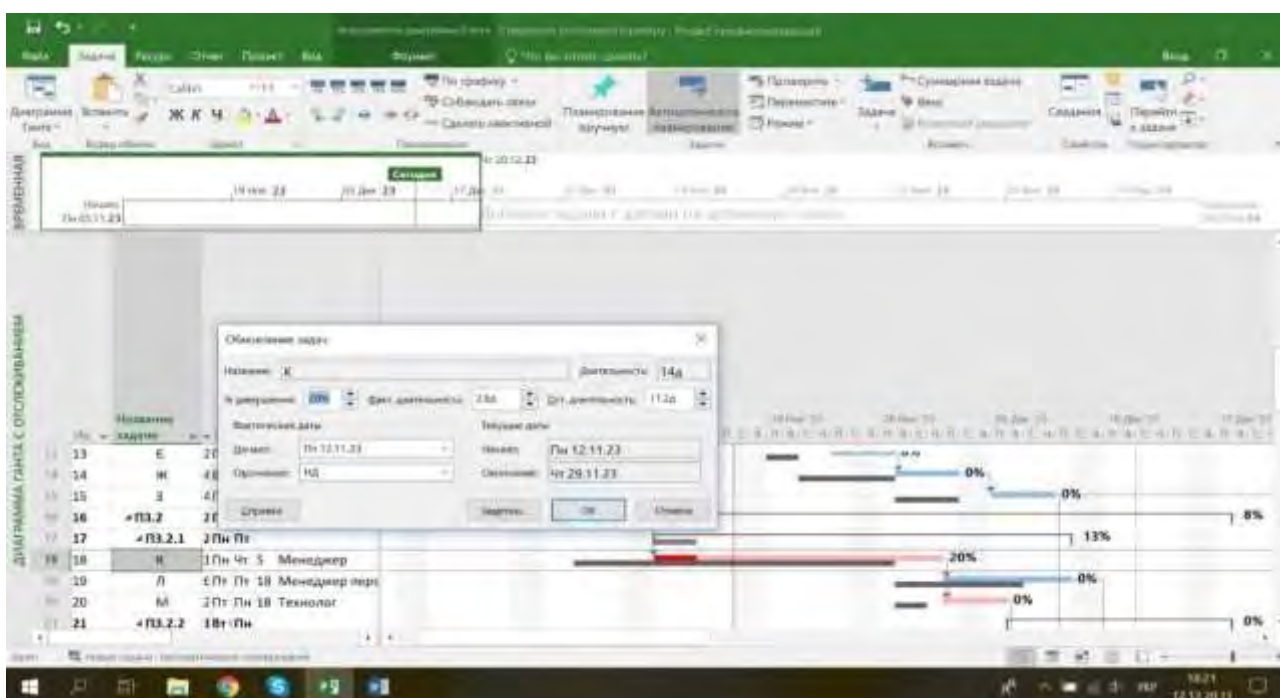


Fig. 6. Monitoring of the implementation of the project to create a LC for K work

Table 2. Results of the completed volume of the LC creation project

Indicator	The essence of the indicator	Actual indicator value
Planned (budgeted) cost of works (planned PV volume)	It is the amount of the planned budgeted cost of work to be performed under the project as of a certain date under consideration. It is calculated based on the project plan.	31 040 UAH
Actual cost of work performed (actual AC costs)	Calculated as the amount of actual project costs as of the date under consideration based on accounting documents	11 840 UAH
Budgeted cost of actually performed works (utilized volume EV)	Calculated as the amount of the budgeted value of all work actually performed on the project as of the date under review, based on actual project status reports	31 040 UAH
Deviation from the cost (CV)	$CV=EV-AC$ Indicates in monetary terms of the extent to which more resources were spent on the work already completed compared to what was planned	19 200 UAH The reason for savings – change in the price of resources
Deviation from the schedule (SV)	$SV=EV-PV$ Indicates in monetary terms the extent to which the work performed at planned prices is less than planned	0 UAH due to advancement of the planned calendar schedule in monetary terms
Cost performance index CPI	$CPI=EV/AC$	2,621621622 CPI>1 indicates cost savings
Schedule performance index SPI	$SPI=EV/PV$	1 SPI>1 indicates cost savings
Cost deviation index CDI	$CDI=CV/EV$	0,618556701030 CDI<1 indicates cost savings

Thus, the monitoring results proved the need for optimization, the essence of which is to hire an additional manager and an economist with the corresponding cost of work per hour (180 UAH/hour and 90 UAH/hour, respectively). This made it possible to get rid of the conflict. Comparing the calendar schedule before and after optimization, we observe positive dynamics in the project implementation, as evidenced by the date of its completion – 18.03.2024, which remained unchanged after the resources were equalized. Along with monitoring, the project implementation procedure for the creation of a logistics center includes project risk management. Practice shows that due to instability in politics, the economy, the social sphere, cash shortages, inflationary surges, social aggression, natural disasters, etc. the project may not be completed. Therefore, achieving the ultimate goal requires identifying and minimizing risks, which is the prospect of future research.

Conclusion and further development prospects

The article discusses an applied task of implementing a project to create a logistics center based on Microsoft Project. The results of the study presented for consideration have led to a number of conclusions. The main ones are as follows.

For the successful implementation of the post-war reconstruction of the country, it is necessary to rely on project management and its applied tools, which include *Microsoft Project*. It is outlined that project planning and management include, in particular, monitoring and risk assessment. The implementation of the logistics center project was monitored in *Microsoft Project*, which revealed the need for optimization, the essence of which is the additional involvement of a manager and an economist with the corresponding cost of work per hour (180 UAH/hour and 90 UAH/hour, respectively). This made it possible to get rid of the conflict. The calendar schedule before and after the optimization was compared. A positive trend in project implementation was established, as evidenced by the completion date of 03/18/2024. This date remained unchanged after the resources were equalized. The proposed developments practically prove the value of project management and create the basis for identifying and minimizing risks, which is the prospect of future research.

Recommendations

When planning investment projects, we suggest that entrepreneurs, local and state authorities use *Microsoft Project* and its modifications, in particular: *Project Expert*, *Spider Project*, *Worksection*.

References

1. "Post-war reconstruction of Ukraine: which countries took patronage over cities and regions", available at: <https://www.slovoidilo.ua/2023/03/01/infografika/suspilstvo/pislyavoyenne-vidnovlennya-ukrayiny-yaki-krayiny-vzyaly-shefstvo-nad-mistamy-ta-oblastyamy> (last accessed 21.05.2023)
2. Rach, V., Medvedieva, O. and Zhuk, Ju. (2021), "Minimax ranking method for prioritization problems in project portfolio management and business analysis", *Intelligent Information Systems for Decision Support in Projects and program management: collective monograph*, European University Press, Riga: ISMA, P. 215–230. DOI <https://doi.org/10.30837/MMP.2021.215>.
3. Bushueva, N. (2007), "Models and methods of proactive management of organizational development programs" ["Modeli i metody proaktivnogo upravleniya programmami oganizacionnogo razvitiya"]: monograph., UPMA, 199 p.
4. Andreeva, T., Petrovska, T., Tytar, T. (2011), "Project management as a means of achieving the company's goal" ["Proektnyi menedzhment yak zasib dosiahnennia mety pidpriemstva"], *Bulletin of the Transport and Industry Economy*, No. 34, P. 364–370, available at: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=Vetp_2011_34_222
5. Beskorovainyi, V., Kolesnyk, L., Yevstrat, D. (2022), "Formalization of the problem of transport logistics optimization networks at the stage of reengineering", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, No. 2 (20), P. 5–13. DOI: 10.30837/ITSSI.2022.20.005
6. Lytvynenko, D., Malyeyeva, O. (2022), "Risk management in projects of restoration the regional transport structure on the basis of participants' communication", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, No. 2 (20), P. 44–51. DOI: 10.30837/ITSSI.2022.20.044
7. Boichenko, E., Vasilchuk, N. (2017), "Monitoring of international donor support in the context of development of the united territorial communities", *Baltic Journal of Economic Studies*, No. 3 (5), P. 25–32. DOI: <https://doi.org/10.30525/2256-0742/2017-3-5-25-32>.
8. Bowen, R. (2013), "Implementing Best Communication Practices With Your Project Team", Bright Hub Project Management, available at: <http://www.brighthubpm.com/resourcemanagement/60211-communicating-effectively-with-your-project-team/> (last accessed 21.05.2023)
9. "Post-war reconstruction of Ukraine: which countries took patronage over cities and regions" [Pislyavoyenne vidnovlennya Ukrainy: yaki krayini vzyali shefstvo nad mistami ta oblastyami], available at: <https://www.slovoidilo.ua/2023/03/01/infografika/suspilstvo/pislyavoyenne-vidnovlennya-ukrayiny-yaki-krayiny-vzyaly-shefstvo-nad-mistamy-ta-oblastyamy> (last accessed 21.05.2023)
10. Rach, V., Medvedieva, O., Zhuk, Ju. (2021), "Minimax ranking method for prioritization problems in project portfolio management and business analysis", *Intelligent Information Systems for Decision Support in Projects and program management: collective monograph*, European University Press, Riga: ISMA, P. 215–230. DOI <https://doi.org/10.30837/MMP.2021.215>
11. Vasylevska, A. (2012), "Enterprise project management using information technologies" ["Upravlinnia proektamy pidpriemstva iz vykorystanniam informatsiinykh tekhnolohii"], *Bulletin of the Kyiv National University of Trade and Economics*, No. 1, P. 99–105, available at: <http://visnik.knteu.kiev.ua/files/2012/01/10.pdf>
12. "Project Management Institute (PMI)", available at: <https://www.pmi.org/> (last accessed 21.05.2023)
13. Koblianska, I., Mishenin, Ye., Medvid, V., Maistrenko Yu. (2018), "Sustainable regional development policy formation: role of industrial ecology and logistics", *Entrepreneurship and sustainability issues*, No. 6 (1), P. 329–341 DOI:10.9770/jesi.2018.6.1(20)
14. Polishchuk, O., Kulinich, T., Martynovych, N., Popova, Yu. (2022), "Digitalization and sustainable development: the new covid-19 challenge requires non-standard solutions", *Problemy Ekorozwoju*, No. 17(2), P. 69–79. DOI: 10.35784/pe.2022.2.08
15. Rusanova, S. (2023), "Applied imperatives of project management in port logistics. Part I. Planning of the logistics center creation project" ["Prykladni imperatyvy upravlinnia proiektamy v portovii lohistytsi. Chastyna I. Planuvannia proiektu stvorennia lohistychnoho tsentru"], *electronic magazine "Scientific News of Daliv University"*, No. 1 (23). P. 211–225.

16. Brodska, A. (2013), "The use of information technologies in enterprise project management", *Management of the development of complex systems*. Vol. 13, P. 8–11, available at: <http://urss.knuba.edu.ua/files/zbirnyk-13/8-11.pdf>
17. "Worksection: Ukrainian project management system", available at: <http://worksection.com/ua/> (last accessed 21.05.2023)

Received 12.05.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Русанова Світлана Сергіївна – Одеський національний морський університет, асистент кафедри "Експлуатація портів і технологія вантажних робіт", Одеса, Україна; e-mail: rusanova20140909@gmail.com; ORCID ID: 0000-0003-3624-6582

Rusanova Svitlana – Odesa National Maritime University, Assistant Professor at the Department of Port Operation and Cargo Handling Technology, Odesa, Ukraine.

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ПРОЄКТАМИ В ТРАНСПОРТНІЙ ЛОГІСТИЦІ

Частина 2. Планування й управління проєктом створення логістичного центру в Project Management

Стаття є продовженням регулярних досліджень, присвячених управлінню проєктами на базі ефективного транспортного забезпечення. **Мета роботи** – підвищення ефективності прийняття управлінських рішень під час реалізації проєктів у транспортній логістиці з допомогою використання автоматизованих систем планування й аналізу. Об'єктом **вивчення** є процес формування організаційного забезпечення управління проєктами в транспортній логістиці з використанням автоматизованих систем планування й аналізу ефективності проєкту. **Предмет дослідження** – практичний інструментарій організаційного забезпечення управління проєктами в транспортній логістиці з використанням автоматизованих систем планування й аналізу ефективності проєкту. **Методи.** У процесі дослідження реалізовано системний підхід, використані загальнонаукові методи, зокрема логічний аналіз, синтез, індукція, дедукція, аналогія, моделювання. Теоретико-методичною основою вивчення стали фундаментальні положення з проєктного менеджменту, теорії ефективності управління, наукові праці вітчизняних і зарубіжних учених щодо управління проєктами на мікро-, мезо- й макрорівнях. З огляду на мету роботи поставлено та розв'язано декілька завдань. Окреслено прикладні імперативи планування ресурсів і бюджету на прикладі логістичного центру на базі одеського морського порту й здійснено спостереження за реалізацією проєкту в *Microsoft Project*. У частині планування ресурсів і бюджету доведено доцільність використання методу та показників освоєного обсягу. Проаналізовано фактичний хід виконання проєкту за плановими показниками. З використанням програмного продукту *Microsoft Project*, способом уведення даних створено новий проєкт. У частині моніторингу сформульовано **висновки** про перебіг подій у реалізації проєкту та наочно показано стан реалізації за окремими видами робіт. Усе це дало змогу здобути конкретні **результати**. У частині планування ресурсів і бюджету визначено, наскільки відбувається відхилення від запланованих строків реалізації проєкту. У частині моніторингу встановлено необхідність в оптимізації кадрового, бюджетного й часового параметрів. Сутність цієї оптимізації зводиться до рішення додаткового залучення трудових ресурсів із відповідною вартістю робіт за годину. Це дало змогу позбавитися конфлікту й досягти позитивної динаміки в реалізації проєкту, про що свідчить дата його завершення, яка після вирівнювання ресурсів залишилася без змін. Окреслено необхідність продовження дослідження та зосередження уваги на управлінні ризиками проєкту.

Ключові слова: проєкт; планування проєкту; реалізація проєкту; управління проєктом; портова логістика; транспортна логістика; логістичний центр.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Русанова С. С. Автоматизована система управління проєктами в транспортній логістиці. Частина 2. Планування й управління проєктом створення логістичного центру в Project Management. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 2 (24). С. 212–220. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.212>

Rusanova, S. (2023), "Automated project management system in transport logistics. Part 2. Planning and managing a logistics center project in Project Management", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (24), P. 212–220. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.212>

A. KHOVRAT, D. TESLENKO, N. HULIEV, V. KYRIY

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE ECONOMIC BEHAVIOR IRRATIONAL COMPONENT OF UKRAINIAN SOCIETY IN SPECIFIC MARKETS

The subject matter of the article is the theoretical-methodical and applied principles of behavioural economics and their implementation in Ukrainian society. **The goal of the work** is to analyse the theory of irrationality in the economic context to find out what its character is in modern Ukrainian conditions, as well as to confirm the main paradoxes inherent in the individual's decision-making behaviour. The following **tasks** were solved in the article: highlighting important aspects of the theory of irrationality for experimental analysis; determination of the methodology of experiments based on internationally recognized works; proposing a hypothesis regarding Ukrainian realities; conducting experiments according to the proposed methodology to test the proposed hypotheses and systematize the obtained results. The following **methods** are used: analytical and inductive methods for determining the set of behavioural experiments and building hypotheses regarding their results; experimental method and method of mathematical processing to check the presence of selected behavioural deviations in Ukraine. The following **results** were obtained: it was determined that in Ukrainian society there is a difference between the degree of individualistic attitudes in different age groups; determined change in the perception of information of different generations as a result of more significant digitization of the young population; a higher tendency of children to risk for certain conditions is determined; the similarity of the obtained results of the experiments with the global ones are established and the impact of technologies on the economic behaviour of individuals and the peculiarities caused by the historical context and expanded access to information, in general, are determined. **Conclusions:** the use of analytical and inductive methods in combination with an experimental approach confirmed the existence of some of the classic behavioural patterns for modern Ukrainian society, in particular: the Allais paradox, the effect of bounded rationality, the effect of joining the majority, the effect of ownership and asymmetric dominance. In addition, based on the obtained results, it was determined that for Ukraine there is a significant difference between the nature of irrationality in different age groups, however, the postulation of this statement beyond the selected target groups requires additional research, as well as consideration of the context of other market entities.

Keywords: behaviour; irrationality; Ukrainian society; decision-making process.

Introduction

Decision-making is one of the key stages in any economic process. These can be decisions, for example, either by a consumer to buy a product, or by a company to manufacture new products or change prices, or to adopt a certain law or reform at the state level. All processes directly predict the outcomes of choices, so this issue has been repeatedly considered by leading scholars in economic theory and has become the main reason for revising its current norms. This is mainly true of the neoclassical approach, which is based on the idea that all people act rationally.

The concept of irrationality as a counterpoint to this statement is increasingly considered in the works of scientists, including Nobel Prize winners M. Allais, D. Kahneman, A. Tversky and R. Thaler [1], as well as in the studies of D. Ariely [2], G. Simon [3], D. Ellsberg [4].

It is important that the principles developed by scientists are actively used in modern practice both in individual companies and at the state level in order to

increase the efficiency of their own activities. As for the Ukrainian context, although this issue has been discussed in scientific articles, it has not received either significant theoretical dissemination or active practical implementation. This determines the relevance of this study.

Analysis of recent studies and publications

One of the founders of the classical theory, A. Smith, began to talk about the emotionality of human choice, and, accordingly, irrationality, in the economic context. In the middle of the eighteenth century, he published his book *The Theory of Moral Sentiments*, which was used as a basis for his more famous works, *The Wealth of Nations* and *Essays in Philosophical Subjects*. In the first work, A. Smith emphasized that people are not trying to achieve material well-being, but the reason for their desire for wealth is the desire to be different and be recognized. At the same time, considering the emotionality of the individual in this context, A. Smith becomes a follower of the theory

of the economic man, or *homo economicus*, which is introduced into public opinion by J. Stuart Mill [5].

This amount of attention and research to refute the concept of a rational person has given rise to a new scientific field – behavioral economics. This area of theoretical thought studies the influence of psychological factors on people's decisions in various economic situations.

This area has been the mainstream of economic theory for many years. However, the criticism of this theory and the growing number of paradoxes (as emphasized by E. Cartwright in [1]) led to the emergence of behavioral economics.

It is based on the prospect theory of D. Kahneman and A. Tversky. The essence of their theory is that an individual builds his or her own value curve and calculates utility values, taking into account potential outcomes and relevant probabilities.

Today, the prospect theory continues to be gradually established as a fundamental theory of utility, as noted by scientists D. Arnott and S. Gao (Monash University, Australia) in their work on behavioral economics [6].

After the first article by D. Kahneman and A. Tversky, economist R. Thaler studied this area in more detail. The researcher went beyond the individual and began to consider the economic behavior of society as a single organism. The essence of R. Thaler's work [7] is that it is possible to adjust public choice without limiting it, based on a person's reaction to certain events. This contributed to the growing popularity of behavioral theory in general and became the basis for numerous experiments. In particular, the work of D. Ariely is devoted to the factor of dishonesty in the activities of economic entities [2]. R. Schiller focuses on the problem of the impact of information on irrationality [8]. S. Basu and S. Sugat (University of Cagliari) study the change in irrational behavior under the influence of social shifts [9]. A. Sandmo studies modern approaches to the theory of prospects by D. Kahneman and A. Tversky [10]. Some of these works will be discussed below in the analysis of behavioral effects inherent in modern conditions.

In the Ukrainian context, N. Pylypenko and V. Belyaeva have considered the problems of irrational behavior. The scientists identified the possibilities of applying behavioral theory in the formation of economic policy in Ukraine [11]. Another important domestic achievement is the work of N. Tsyganova [12], which is devoted to the financial market in the context of irrational behavior of individuals.

Identification of previously unsolved parts of the overall problem.

Purpose of the work, tasks

The aim of the study is to analyze the theory of irrationality in the economic context to determine its nature in modern Ukrainian conditions, as well as to confirm the main paradoxes inherent in the behavior of an individual in decision-making.

To achieve this goal, the experimental method will be used, taking into account the studies already conducted by well-known scientists. The method of mathematical processing will be used to determine the presence of behavioral deviations. Analytical and inductive methods will be used to select experiments and build hypotheses about their results.

The object of the study is the economic irrational behavior of individuals. The subject is the theoretical, methodological, and applied foundations of behavioral economics and their implementation in the conditions of Ukrainian society.

This leads to the following tasks:

- highlighting important aspects of the theory of irrationality for experimental analysis;
- determination of the research methodology based on internationally significant works;
- formulation of the hypothesis taking into account Ukrainian realities;
- conducting experiments according to the proposed methodology to test the hypotheses;
- systematization of the results obtained.

Materials and methods

Limited rationality

One of the first fundamental concepts to criticize the neoclassical approach was G. Simon's theory of limited rationality [3]. The scientist himself sees the reason for this as the presence of a large number of alternatives to a choice when a person cannot make it optimal, usually due to lack of time.

This concept is confirmed by an experiment conducted in 2000 by two psychologists, S. Iyengar and M. Lepper [13]. The scientists aimed to show that in the presence of a large number of alternatives, a person begins to get lost and eventually cannot make a choice. As an example, customers were offered jam on supermarket shelves. The study found that the stand with 24 types of jam attracted the attention of most people.

Of the 242 customers who passed by the stand, 60% stopped. The second booth had only six types of jam, and out of 260 visitors, 40% paid attention to it. However, of those who stopped at the first stand, only 3% made a purchase, and 30% made a purchase at the stand with six types of jam.

To test the rationality, it is proposed to conduct a similar experiment, but without a real product. The subject of choice is yogurt. The sample will include teachers and students of grades 9, 10, and 11 of Kharkiv Gymnasium No. 46 named after M. V. Lomonosov.

In the first version of the study, the participants are given 10 possible alternatives to choose from, with each one indicating the quality of the product and its price. In order to make the experiment more realistic, the exact value of quality is not disclosed. The main goal is to show that if there are 10 yogurt options to choose from, and you have to choose the best one in terms of quality and price in a limited time (1 minute), a person will not have time to analyze all the options and will make a choice intuitively. By using this configuration, we brought the experiment closer to the concept of bounded rationality.

In the second version of the experiment, the number of yogurt types was limited to three, so that in 1 minute a person could more likely analyze information about the quality and price of the dairy product.

It is predicted that in the second version of the study, the answers will be more rational than in the first. Thus, G. Simon's concept will be confirmed for modern Ukrainian conditions.

Effect of ownership

P. Thaler in 1980 in his article "Toward a positive theory of consumer choice" [14] describes the underestimation of opportunity cost and inertia that is part of the consumer's choice process. The point is that a person who owns a product values it higher than items he or she does not own. This process is called the "possession effect". A few years later, D. Kahneman in his work [15] offered the following example.

A man is a fan of a music band. He buys a ticket to a concert for \$200, provided that he could pay no more than \$500 for the same ticket. After receiving the ticket, the man is offered to sell it for \$3,000, but he refuses to sell it. Thus, the minimum selling price is more than \$3,000, and the maximum buying price is \$500. This price discrepancy is a manifestation of the possession effect.

In order to investigate the prevalence of this effect, we can model the experiment conducted by J. Knetch in 1989 [16].

In the first version, the researcher gave the students cups of coffee as compensation for filling out a short questionnaire. After a while, J. Knetch showed them another gift – a bar of Swiss chocolate – and offered to exchange it. However, 89% of the students kept the coffee. In the second variant, the participants were offered a choice between chocolate and coffee. The percentage of respondents who chose coffee was 56%. The third variant was the same as the first, but first J. Knetch gave everyone chocolate, and then showed them a cup of coffee. In contrast to the first option, the number of students who chose coffee was 10%.

This experiment showed that underestimation can occur even when the influence of income is excluded. It is worth noting that the study was criticized for the small sample of people belonging to the same age group and for the types of goods. Opponents emphasized that if other groups of goods were chosen, the results would be different. However, the existence of this effect for goods of the same category is not in doubt.

In contrast to the classical experiment configuration, this study will be tested by replicating it among people related to education: schoolchildren, students, and teachers. The sample will include 9th, 10th, and 11th grade pupils and teachers from Kharkiv Gymnasium No. 46 named after M. V. Lomonosov, as well as teachers and students from the Kharkiv National University of Radio Electronics.

It is expected that J. Knetch's results will be replicated by conducting an experiment with coffee and chocolate for all age groups. However, in order to confirm the opinion about the possible absence of the possession effect, another configuration of the study with several options is proposed.

It should be based on goods that are unequal in nature, so that one of them is not desirable for respondents in each variant, for example, postcards and pens. Since the latter items are useful for everyone involved in the education system, it is predicted that there will be no possession effect for leaflets, which have no significant practical use.

In the first variant, the study participants will be provided with pens. After a while, they will be offered other gifts – postcards. It is assumed that the majority will keep the pen. In the second option, people will be given the opportunity to choose between postcards and pens. It is likely that the percentage of people who will choose the latter alternative will be much higher

than J. Knetch received in his experiment. The third option, as in the original, repeats the first. However, it is worthwhile to hypothesize here that the number of participants who would choose a pen over a postcard would still remain high.

Allais paradox

As noted above, one of the main assumptions on which Kahneman and Tversky's prospect theory is based is the Allais paradox. This is a situation in which the consumer does not want to achieve maximum utility, as stated in neoclassical theory, but maximum reliability.

As a proof of this paradox, D. Kahneman and A. Tversky cite the following experiment [15]. In the first variant, the subject is given \$1,000 and then offered one of two possible alternatives: with probability one player will definitely receive \$500 or with probability 1/2 the person will either receive nothing or win another \$1,000.

In the second variant, the alternatives are slightly different from the initial situation – the player is given \$2000: with probability one player loses \$500 or with probability 1/2 the person either loses nothing or loses \$1000.

In the former case, people almost always (84%) choose not to take risks, while in the latter case, they tend to take risks (69%). That is, the majority does not like risk when it comes to winning and almost always chooses to withdraw the amount, but in a situation of possible loss, people are willing to take risks. It should be understood that the essence lies not in the value of the win itself, but in the changes associated with it. As scientists explain, it is harder to lose than to gain.

However, it should be noted that this effect is not always observed; if the amounts determined in the experiment are insignificant for respondents, the percentage of those willing to take risks is much higher. The purpose of our work is to test this statement.

To do so, in addition to the configuration described above (with a tenfold decrease in the amounts due to the peculiarity of the sample), we will conduct another study.

This time, the options will be as follows. In the first situation, the participant is given 100 UAH and then offered one of two possible alternatives: with probability one player definitely receives 50 UAH or with probability 1/2 the person either receives nothing or wins another 100 UAH.

In the second variant, the alternatives are slightly different from the initial situation – the player is given 200 UAH: with probability one player loses 50 UAH or

with probability 1/2 the person either loses nothing or loses 100 UAH.

All these amounts will be offered hypothetically, so this may cause a slight decrease in the effect itself, as respondents will not fully experience the possession of the money.

The asymmetric dominance effect

In 2008, D. Ariely conducted an experiment [2] that showed that a person's choice often depends not on an objective analysis of the actual situation, but on its subjective perception. During the study, the researcher offered students two situations with a subscription to *The Economist* magazine.

In the first option, participants had to choose between three alternatives: a subscription to the electronic version of the magazine with access to the archive for \$59; a subscription to the print version for \$125; a subscription to the electronic and print versions of *The Economist* with access to the archive for \$125.

In the end, 16% of respondents chose the first option; 0% chose the second; and 84% chose the third.

In another situation, a second alternative was added, which resulted in different results, which, according to the classical theory, should not have been different: 68% of students chose the first option; 32% chose the option with electronic and printed versions.

D. Ariely explains this by the existence of the so-called attraction effect (another name is the asymmetric dominance effect). Since in the first situation, the individual saw that the third offer was more favorable than the second, he or she chose it, although, as the results of the second experiment show, the need for the printed version was not significant.

There is no information on whether this experiment was conducted in Ukraine. Therefore, this question remains open. Especially if we consider that over time, people's attitudes toward electronic media, including *The Economist*, have changed compared to print versions. Therefore, it is worthwhile to assume about the likelihood of possible results if D. Ariely's study is repeated in modern Ukrainian conditions.

It should be noted that the likelihood of differential results for different age groups is quite high. This is due to the fact that in our country, according to the observations of the Internet Association of Ukraine, the population aged 45 and older uses the Internet less. However, the coverage among the younger generation is quite high. It is likely that for the age group under 45, the percentage of those who would choose the cheaper

electronic version in both situations will be higher than for those aged 45 and older.

Given the sample, the above hypothesis can be tested. It should be emphasized that it applies to Ariely's experiment, not to the lure effect, which is likely to work properly, but for a small group of respondents.

To confirm or deny the existence of this effect in modern conditions, it is necessary to modify the choice alternatives. For consideration, the research participants are offered the situation of buying a laptop.

In the first variant, they must choose between three alternatives: laptop A at a price of \$1050 and a 2.5-year warranty; laptop B at a price of \$1,200 and a 2-year warranty; and laptop C at a price of \$825 and a 1.5-year warranty. It is expected that in this case, gadget A, which has advantages over laptop B in terms of warranty and price, will be chosen by more people than laptop B.

In the second variant of the experiment, participants are offered: laptop A at a price of \$700 and a warranty period of 2.5 years; laptop B at a price of \$550 and a warranty of 1.5 years. Similar to Ariely's study, people have to choose the second alternative.

Effect of joining the majority

J. Levav and D. Ariely [17] described a study of the effect of joining the majority. During the experiment, the researchers, acting as waiters, offered free beer to visitors in a North Carolina bar. D. Ariely and J. Levav identified two groups of people: the first had to order out loud, and the second had to mark the menu anonymously. Along with beer samples, the scientists gave visitors a short questionnaire asking whether they liked the drink they had chosen and whether they regretted choosing a particular type of beer.

In the process of checking the questionnaires, D. Ariely and J. Levav found that people who ordered out loud were much less satisfied with their choice than those who decided on a beer without the influence of others' opinions. There was one exception: the participant who publicly ordered the beer first was in the same conditions as those who expressed their opinions anonymously, as he was not limited by the choices made by others.

However, D. Ariely notes that in some cultures, where the need for uniqueness is not a positive trait, people, on the contrary, are subject to the effect of joining the majority. A similar experiment in Hong Kong confirmed this thesis.

Taking into account D. Ariely's study, it was decided to repeat it and find out which principle is used

by the majority of Ukrainians. It is assumed that the younger generation will have a more individualistic attitude in the context of the information society and advanced globalization processes than people who grew up in a socialist state formation, where, according to a number of historical studies, the collective good prevailed over the individual good.

It should be noted here that there is a possibility of bias, as the respondents belong to the same sphere. As for the structure of the sample, it varies: teachers and schoolchildren of Kharkiv Gymnasium No. 46 named after M.V. Lomonosov, teachers and students of the Kharkiv National University of Radio Electronics.

To test the hypothesis, it was decided to develop an experiment with candy. To do this, respondents should be divided into groups of 5. Four participants will know the essence of the experiment, and the statement will be tested on the decision of the fifth respondent. A total of four types of candy will be provided in order to fully satisfy the taste preferences of the participants and thus reduce the possible bias caused by someone not liking other types of candy.

Research results and discussion

Limited rationality

Based on the methodology described above, each configuration of the experiment was administered to students and teachers. Table 1 shows the quantitative distribution among the respondents.

Table 1. *Quantitative distribution of respondents*

Name of the group	Extended list	Limited list
Schoolchildren (14–17 years old)	63	57
Teachers (40–55 years old)	15	16

In the first experiment, the most optimal option is the 9th option, which has the highest quality-to-price ratio of 2.28. As predicted, respondents were mostly lost among a large number of alternatives, so the most optimal option was chosen by 19% of students and 26.7% of teachers. The 5th option, close to the optimal one, was chosen by 9.5% of students and 6.7% of teachers. A slightly higher percentage of rational choices among teachers can be explained by faster cognitive processes related to the nature of the profession, as well as a smaller sample. The results can be found in more detail in the diagram (see Fig. 1).

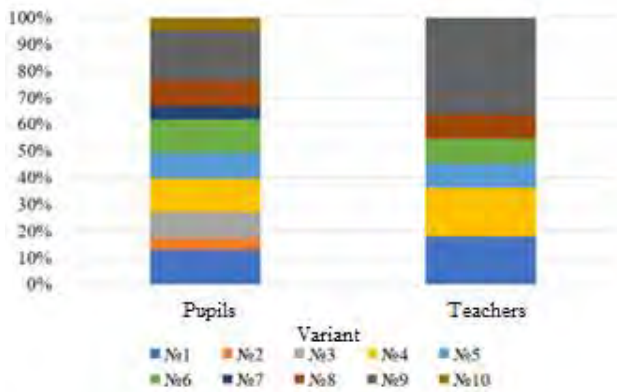


Figure 1. Distribution of answers for the extended list

In the second experiment, the most optimal yogurt to choose was the 3rd option with a quality-to-price ratio of 1.93. The prediction above was confirmed. With only three alternatives to choose from, respondents approached the question more rationally, being able to calculate the quality-to-price ratio. The diagram (Fig. 2) shows that the number of students who made the most optimal choice is 68.4%, and teachers – 75%.

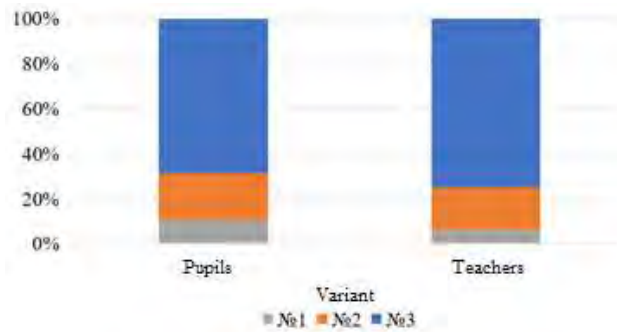


Figure 2. Distribution of answers for the limited list

Effect of ownership

Several experiments of each configuration were conducted. In total, the three groups of respondents (pupils, students, and teachers) were interviewed six times.

Table 2 shows the distribution of participants. For better perception of the results, we will use the following symbols for different variants: SC-1 – coffee is offered first; SC-2 – respondents are given a choice between chocolate and coffee; SC-3 – chocolate is offered first; PC-1 – a pen is given first; PC-2 – respondents are given a choice; PC-3 – a postcard is given first.

Given the results, the hypotheses put forward above can be considered confirmed if we take into account the rather small sample of teachers for each experiment and some age characteristics of the participants.

Table 2. Quantitative distribution of respondents

Variant	Pupils	Students	Teachers
SC-1	16	21	10
SC-2	17	23	11
SC-3	14	19	10
PC-1	15	25	10
PC-2	16	23	10
PC-3	16	22	11

The diagram below (Fig. 3) shows that although the chocolate and coffee experiment reproduce the ownership effect for students much better than the postcard and pen experiment, there are much fewer respondents who chose coffee in each of the variants than described in Knetch’s work. We explain this by the fact that students are less fond of coffee than chocolate, so, despite the possible configuration, given the alternative of getting sweets, coffee will be considered more desirable.



Figure 3. J. Knetch’s experiment with pupils

Further results revealed that the ownership effect for the postcard and pen variant, as mentioned, does not work properly. This is because the product groups are quite different and, unlike the pen, the postcard is not a necessity for the students. And since coffee is a good similar to chocolate for students, the results in this experiment (Fig. 4) better illustrate the possession effect.

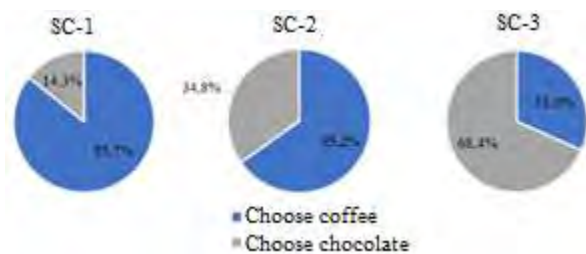


Figure 4. J. Knetch’s experiment with students

Similarly to the situation with the schoolchildren survey, the results in the second configuration of the experiment for students showed that the ownership effect does not always work.

Although the results of the study among teachers repeat the situation with students, it is not worth insisting

on their reliability due to the limited sample size. Therefore, the claim that age does or does not affect the existence of the ownership effect in this study is not proven.

Allais paradox

Based on the chosen methodology, several experiments of each configuration were conducted. In total, three groups of respondents (pupils, students, and teachers) were interviewed six times. Table 3 shows the number of participants in each case.

Table 3. *Quantitative distribution of respondents*

Variant	Pupils	Students	Teachers
With dollars	62	37	14
With hryvnias	64	39	15

As expected, during the second survey with dollars, respondents mostly chose a risk-free position in both the first and second versions. Although in the first, it was even more significant. The diagram (Fig. 5) shows the percentage of people who chose the first option (the one without a risk element) in each of the options. However, it is worth emphasizing a certain peculiarity: schoolchildren have a greater propensity to take risks than older people who belong to a certain profession.

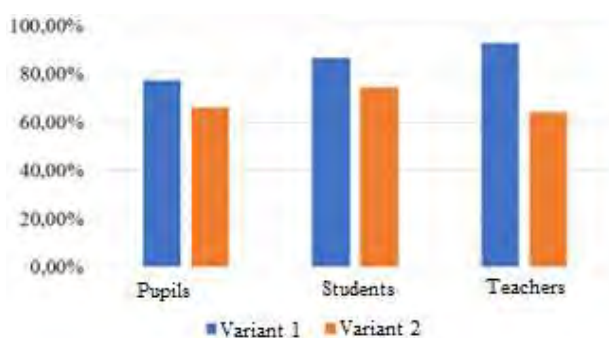


Figure 5. Experiment with dollars

In the course of the study in a different configuration, i.e. with hryvnias, the prediction was also justified. People tend to take more risks when the amount of money is small. In addition, the above statement about a greater willingness to take risks on the part of schoolchildren is also true in this situation.

Effect of asymmetric dominance

Based on the methodology described above, a questionnaire was developed to interview the respondents.

During the experiment, 160 people aged 15 to 63 were interviewed. Table 4 shows the age distribution of participants.

Table 4. *Quantitative distribution of respondents*

Group	Experiment with subscription	Experiment with laptops
Pupils (14–17 years old)	73	73
Students (17–23 years old)	47	47
Teachers (40–57 years old)	40	40

Based on the results of the first situation describing a journal subscription, it can be noted that the hypothesis put forward earlier about the differentiation of responses for different age groups has been confirmed. Students who were directly related to the IT sphere chose the option with the electronic version even more often than pupils did, while teachers (40 people were interviewed in total) confirmed Ariely's experiment in full.

The results of the second set of alternatives, for their part, confirm the existence of the lure effect for all age groups, although the amounts for teachers are much larger than for students or pupils.

In the second experiment, as predicted, the effect of asymmetric dominance is much more significant since the problem of disproportionate use of the Internet is not included in the formulation of the situation (meaning the contrast between the print and online versions of the journal). A slight deviation from the average results is observed among teachers. In the absence of a laptop (lure), the percentage of respondents who changed their choice is high.

Effect of joining the majority

The distribution of respondents during the experiment can be found in Table 5.

Table 5. *Quantitative distribution of respondents*

Group	Experiment with subscription	Experiment with laptops
Pupils (14–17 years old)	10	50
Students (17–23 years old)	5	25
Teachers (40–57 years old)	6	30

As expected, most schoolchildren and students chose a different option than all the participants before them; while teachers, representatives of the older generation, most often chose the same candy as their predecessors.

Conclusions and prospects for further development

The study examines the concept of individual irrationality and its impact on the main market actors: the consumer, the firm, and the state. This was done by analyzing the existing theory, in particular, the prerequisites for the emergence of the concept of homo economicus, its criticism, and the fundamental provisions of the behavioral framework.

In order to determine the nature of the described effects and paradoxes in the modern Ukrainian context, a number of experiments conducted by J. Knetch, D. Ariely, D. Kahneman, A. Tversky, R. Thaler, and S. Iyengar were analyzed. In the process of analyzing these studies, hypotheses are formulated regarding possible features of the Ukrainian situation.

Among the most important assumptions are the following:

- difference between the degree of individualistic attitudes in different age groups;
- modified perception of information by different generations due to the greater digitalization of young people;

- higher risk-taking among schoolchildren;
- the presence of all these effects only under certain conditions.

The outlined hypotheses were confirmed during repeated experiments with some modified configurations on samples of students and teachers of Kharkiv Gymnasium No. 46 named after M. V. Lomonosov, students and teachers of Kharkiv National University of Radio Electronics.

Thus, it can be concluded that, in addition to the basic theoretical assumptions peculiar to Ukraine, there is a significant difference between the nature of irrationality in different age groups. However, the experiment is not sufficient to postulate this statement, so it was decided to revise it for further research. In addition, it should be noted that this paper considers only the concept of individual irrationality, so to expand the issue it is important to study the concept of the irrational state and the firm, in particular, the concept of the irrational state, which is distinguished by denying the rational purpose of these market actors.

References

1. Cartwright, E. (2018), *Behavioral Economics*, Routledge, London, 586 p.
2. Ariely, D., Garcia-Rada, X., Gödker, K., Hornuf, L. and Mann, H. (2019), "The impact of two different economic systems on dishonesty", *European Journal of Political Economy*, No. 59, P. 179–195. DOI: 10.1016/j.ejpoleco.2019.02.010
3. Simon, H. A. and Laird, J. E. (2019), *Sciences of the Artificial*, MIT Press, Massachusetts, 256 p.
4. Sakai, Y. (2018), "Daniel Ellsberg on J.M. Keynes and F.H. Knight: risk ambiguity and uncertainty", *Evolutionary and Institutional Economics Review*, No 16 (1), P. 1–18. DOI: 10.1007/s40844-018-0114-9
5. Meramveliotakis, G. and Manioudis, M. (2021), "History, Knowledge, and Sustainable Economic Development: The Contribution of John Stuart Mill's Grand Stage Theory", *Sustainability*, No. 13 (3), P. 1–18. DOI: 10.3390/su13031468
6. Arnott, D. and Gao, S. (2019), "Behavioral economics for decision support systems researchers", *Decision Support Systems*, No. 122 (12), P. 1–12. DOI: 10.1016/j.dss.2019.05.003
7. Thaler, R. (2020), "What's next for nudging and choice architecture?", *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, No. 163, P. 4–5. DOI: 10.1016/j.obhdp.2020.04.003
8. Romani, R. (2021), "Narrative economics: how stories go viral and drive major economic events", *The European Journal of the History of Economic Thought*, No. 28 (3), P. 496–497. DOI: 10.1080/09672567.2021.1928927
9. Basu, S. and Sen, S. (2023), "COVID 19 Pandemic, Socio-Economic Behaviour and Infection Characteristics: An Inter-Country Predictive Study Using Deep Learning", *Computational Economics*, No. 61, P. 645–676. DOI: 10.1007/s10614-021-10223-5
10. Sandmo, A. (2023), "The Market in Economics: Behavioural Assumptions and Value Judgments", *In: Market, Ethics and Religion*, Springer, Cham, P. 19–39. DOI: 10.1007/978-3-031-08462-1
11. Pylypenko, N. and Bieliaieva, V. (2019), "The Possibility of Applying the Tools of Behavioral Economics for Economic Policy in Ukraine", *Ekonomika ta derzhava*, No. 95 (5), P. 95–100. DOI: 10.32702/2306-6806.2019.5.95
12. Tsyganova, N. (2019), "Interaction of Financial Market Subjects in the Condition of the Behavior Economy", *Scientific opinion: Economics and Management*, No 64 (2), P. 174–184. DOI: 10.32836/2521-666x/2019-2-64-21
13. Blasheck, T. L. and Jawwad, N. (2020), "The Dark Side of Variety: An Economic Model of Choice Overload". *The Yale Undergraduate Research Journal*, No. 1 (1), P. 1–19, available at: <https://elischolar.library.yale.edu/yurj/vol1/iss1/38> (last accessed 28.06.2023).
14. Martina, R. A. (2019), "Toward a theory of affordable loss", *Small Business Economics*, No. 54 (3), P. 751–774. DOI: 10.1007/s11187-019-00151-y
15. Rossiter, J. R., (2019), "A critique of prospect theory and framing with particular reference to consumer decisions", *Journal of Consumer Behaviour*, No. 18 (5), P. 399–405. DOI: 10.1002/cb.1779
16. List, J. A. (2021), "Experimental tests of the endowment effect and the Coase theorem", *In: The Art of Experimental Economics*, Routledge, London, P. 85–102. DOI: 10.4324/9781003019121

17. Catapano, R., Shennib, F. and Levav, J. (2022), "Preference Reversals Between Digital and Physical Goods", *Journal of Marketing Research*, No. 59 (2), P. 353–373. DOI: 10.1177/00222437211065020

Received 20.05.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Ховрат Артем Вячеславович – Харківський національний університет радіоелектроніки, магістр зі спеціальності "Інженерія програмного забезпечення", Харків, Україна; e-mail: artem.khovrat@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1753-8929>

Тесленко Денис Максимович – Харківський національний університет радіоелектроніки, магістр зі спеціальності "Інженерія програмного забезпечення", Харків, Україна; e-mail: denys.teslenko@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6289-1633>

Гулієв Нурал Бахадур огли – Харківський національний університет радіоелектроніки, магістр зі спеціальності "Інженерія програмного забезпечення", Харків, Україна; e-mail: nural.hulliev@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2123-0377>

Кириїв Валентина Василівна – кандидат економічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри економічної кібернетики та управління економічною безпекою, доцент кафедри програмної інженерії (за сумісництвом), Харків, Україна; e-mail: valentya.kyryi@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2537-264X>

Khovrat Artem – Kharkiv National University of Radio Electronics, M. Sc. in Software Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Teslenko Denys – Kharkiv National University of Radio Electronics, M. Sc. in Software Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Hulliev Nural – Kharkiv National University of Radio Electronics, M. Sc. in Software Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Kyryi Valentyna – PhD (Economic Sciences), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor at the Department of Economic Cybernetics and Management of Economic Security Department, Associate Professor at the Department of Software Engineering (part time), Kharkiv, Ukraine.

ТЕОРЕТИКО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ІРАЦІОНАЛЬНОГО СКЛАДНИКА ЕКОНОМІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ УКРАЇНСЬКОГО СУСПІЛЬСТВА НА СПЕЦИФІЧНИХ РИНКАХ

Предметом дослідження в статті є теоретико-методичні й прикладні засади поведінкової економіки та їх імплементації для українського суспільства. **Мета роботи** – аналіз теорії ірраціональності в економічному контексті для з'ясування того, який вона має характер у сучасних українських умовах, а також підтвердження основних парадоксів, властивих поведінці індивіда в процесі прийняття рішень. У статті розв'язуються такі **завдання**: виокремлення важливих аспектів теорії ірраціональності для експериментального аналізу; визначення методології експериментів на основі міжнародно визнаних праць; висунування гіпотези щодо українських реалій; проведення експериментів за запропонованою методикою для перевірки висунутих гіпотез та систематизування здобутих результатів. Використовуються такі **методи**: аналітичний та індуктивний методи для визначення необхідного набору поведінкових експериментів та побудови гіпотез щодо їх результатів; експеримент і математичне оброблення для перевірки наявності обраних біхевіористичних відхилень в Україні. Здобуто такі **результати**: визначено, що в українському суспільстві наявна розбіжність між ступенем індивідуалістичних настроїв у різних вікових групах; доведено видозмінене сприйняття інформації різних поколінь унаслідок суттєвішої цифровізації молодого населення; детерміновано вищу схильність школярів до ризику за певних умов; встановлено схожість результатів досліджень із загальноосвітніми здобутками; визначено вплив технологій на економічну поведінку індивідів і встановлено особливості, викликані історичним контекстом і розширеним доступом до інформації загалом. **Висновки**. Застосування аналітичного та індуктивного методів у поєднанні з експериментальним підходом підтвердили існування в сучасному українському суспільстві деяких класичних поведінкових шаблонів, зокрема: парадоксу Алле, ефекту обмеженої раціональності, ефекту приєднання до більшості, ефекту володіння та асиметричного домінування. Крім цього, з огляду на здобуті результати визначено, що для України є суттєва різниця між характером ірраціональності в різних вікових групах, однак визнання цього твердження за межами обраних цільових груп потребує додаткових досліджень і розгляду контексту інших ринкових суб'єктів.

Ключові слова: поведінка; ірраціональність; українське суспільство; процес прийняття рішень.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Ховрат А. В., Тесленко Д. М., Гулієв Н. Б. огли, Кириїв В. В. Теоретико-експериментальне дослідження ірраціонального складника економічної поведінки українського суспільства на специфічних ринках. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 2 (24). С. 221–229. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.221>

Khovrat, A., Teslenko, D., Hulliev, N., Kyryi, V. (2023), "Theoretical and experimental study of the economic behavior irrational component of ukrainian society in specific markets", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (24), P. 221–229. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.221>

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Dr. Chinwi Mgbere	16
Hiroshi Tanaka	200
Андрущенко М. О.	118
Бабешко Є. В.	131
Балаш Л. Я.	5
Барковська О. Ю.	172
Безкоровайний В. В.	16
Бондар А. В.	179
Бушуєв С. Д.	191
Гайко С. І.	27
Гобов Д. А.	39
Груздо І. В.	104
Гулієв Н. Б. огли	54, 161, 221
Еламс Четін	191
Зуєва О. В.	39
Каратаєв О. А.	62
Кирий В. В.	161, 221
Клімішен О. О.	72
Ковальчук О. І.	5
Колесник Л. В.	16
Корнієнко Є. Д.	80
Кочук С. Б.	72
Краснорутський А. О.	72
Лапкін О. О.	179
Лега Є. С.	90
Лейба Я. А.	104
Ляшенко О. С.	80
Ляшенко С. О.	90
Мазурова О. О.	118
Мерзлікін Є. В.	131
Назаров О. С.	54
Невлюдов І. Ш.	145
Новоселов С. П.	145
Перетяга М. Ю.	54
Пілюгіна К. В.	191
Пітерська В. М.	200
Русанова С. С.	212
Самойловська В. П.	200
Содома Р. І.	5
Сорокіна А. С.	161
Сухачов К. І.	145
Тесленко Д. М.	54, 161, 221
Торба А. А.	80
Ховрат А. В.	54, 161, 221
Холєв В. О.	172
Шахов В. І.	200
Широкопетлева М. С.	104, 118
Шубін І. Ю.	62

ALPHABETICAL INDEX

Dr. Chinwi Mgbere	16
Hiroshi Tanaka	200
Andrushchenko Mykola	118
Babeshko Ievgen	131
Balash Liliya	5
Barkovska Olesia	172
Beskorovainyi Vladimir	16
Bondar Alla	179
Bushuyev Sergiy	191
Haiko Svitlana	27
Gobov Denys	39
Gruzdo Iryna	104
Huliiev Nural	54, 161, 221
Elams Chetin	191
Zuieva Oleksandra	39
Karataiev Oleksandr	62
Kyriy Valentyna	161, 221
Klimishen Oleksii	72
Kovalchuk Oleh	5
Kolesnyk Lyudmyla	16
Korniienko Yehor	80
Kochuk Serhii	72
Krasnorutskyi Andrii	72
Lapkin Oleksandr	179
Leha Yevheniia	90
Leiba Yana	104
Liashenko Oleksii	80
Liashenko Serhii	90
Mazurova Oksana	118
Merzlikin Eugene	131
Nazarov Alexei	54
Nevlyudov Igor	145
Novoselov Sergiy	145
Peretiaha Maksym	54
Piliuhina Kateryna	191
Piterska Varvara	200
Rusanova Svitlana	212
Samoilovska Valentina	200
Sodoma Ruslana	5
Sorokina Anna	161
Sukhachov Konstantin	145
Teslenko Denys	54, 161, 221
Torba Aleksandr	80
Khovrat Artem	54, 161, 221
Kholiev Vladyslav	172
Shakhov Valentin	200
Shirokopetleva Mariya	104, 118
Shubin Ihor	62

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**СУЧАСНИЙ СТАН
НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ТЕХНОЛОГІЙ
В ПРОМИСЛОВОСТІ**

Щоквартальний науковий журнал

№ 2 (24), 2023

Відповідальний секретар журналу *І. Г. Перова*

Відповідальний за випуск *А. А. Коваленко*

Редактор *Л. В. Кузьміна*

Комп'ютерна верстка *Л. Ю. Светайло*

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:

буд. 14, проспект Науки, м. Харків, Україна, 61166

Тел.: +38 (057) 704-10-51

Веб-сайт: <http://itssi-journal.com>

E-mail: journal.itssi@gmail.com

Формат 60×84/8. Умов. друк. арк. 12,83. Тираж 150 прим.

Віддруковано з готових оригінал-макетів в типографії ФОП Андреев К.В.

Єдиний державний реєстр юридичних осіб та фізичних осіб-підприємців.

Запис №24800170000045020 від 30.05.2003.

61157, Харків, вул. Акад. Богомольця, 9, кв. 50, тел. +38 (063) 993-62-73

e-mail: ep.zakaz@gmail.com