Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

INFORMATION TECHNOLOGY: COMPUTER SCIENCE, SOFTWARE ENGINEERING AND CYBER SECURITY

Випуск 3

Видавничий дім
«Гельветика»
2023

Журнал включений до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б») за спеціальностями 121 – Інженерія програмного забезпечення, 122 – Комп'ютерні науки, 123 – Комп'ютерна інженерія, 124 – Системний аналіз, 125 – Кібербезпека відповідно до наказів МОН України № 735 (додаток № 4) від 29.06.2021 р. та № 491 (додаток № 3) від 27.04.2023 р.

Науковий журнал «Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security» зареєстрований Міністерством юстиції України (свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації серія КВ № 24879-14819Р від 17.06.2021 р.)

Офіційний сайт видання: www.journals.politehnica.dp.ua/index.php/it

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою програмного забезпечення StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

ISSN 2786-507X (Print)
ISSN 2786-5088 (Online)

УДК 004.043
DOI https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-1

Наталія БОЙКО
кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри систем штучного інтелекту, Національний університет «Львівська політехніка», вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79036, Nataliya.i.boyko@lpnu.ua
***ORCID:** 0000-0002-6962-9363*
***Scopus Author ID:** 57191967462*

Богдан ЛЕВИЦЬКИЙ
студент кафедри систем штучного інтелекту, Національний університет «Львівська політехніка», вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79036, bohdan.levytskyi.knm.2018@lpnu.ua
***ORCID:** 0000-0002-0060-2381*

Бібліографічний опис статті: Бойко, Н., Левицький, Б. (2023). Алгоритми тренування та оцінки моделей машинного навчання для структурованого набору даних. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 3, 3–12, doi: https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-1

АЛГОРИТМИ ТРЕНУВАННЯ ТА ОЦІНКИ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ СТРУКТУРОВАНОГО НАБОРУ ДАНИХ

В статті розглядається послідовний процес попереднього аналізу та обробки структурованих даних про будівельні транспортні засоби різних типів. Наведений алгоритм побудови моделей машинного навчання, зокрема таких як лінійна регресія, дерево прийняття рішень та випадковий ліс, оцінка якості отриманих моделей та продукуючих результатів. Робота описує дослідження сфери покупки та продажу авто на вторинному ринку з використанням сучасних технологій data mining. Основна мета цього дослідження – передбачити вартість транспортного засобу з використанням атрибутів, що сильно корелюють з ціною. Пропонується розглянути концепти ціноутворення побудувавши наступні моделі машинного навчання: з урахуванням ознак специфічних певних марок автомобілів, з урахування ознак специфічних для певних типів автомобілів, а також загальну модель, яка включає усі наявні в наборі ознаки. Моделі було побудовано на основі методів лінійної регресії та дерева рішень. Метою відбору алгоритмів машинного навчання була мінімізація похибок при прогнозуванні вартості, швидкість роботи, легкість інтерпретації отриманих результатів: на основі яких даних приймалося рішення та які дані найбільше впливають на формування вартості. Для мінімізації похибки прогнозування було проведено детальний аналіз даних та їх підготовку для кожного типу будівельного транспортного засобу. Проведено багато експериментів з різними методами для пошуку та видалення аномальних спостережень, для пошуку та використання найбільш важливих ознак, при цьому використовувалися такі методи, як Z-index, міжквартильний розмах, рекурсивне видалення ознак, пошук ознак на основі виявлення залежностей з використанням статистичних методів. Було проведено порівняльний аналіз результатів кожної з моделей, проаналізовано можливі причини тих чи інших результатів. Наведені проблеми, які виникають при вирішенні даної задачі регресійного типу – відбір даних, що якнайкраще узагальнюють систему формування вартості технічного транспортного засобу.

***Ключові слова:** машинне навчання, дані, алгоритм, обробка даних, регресійні моделі машинного навчання, лінійна регресія, дерево прийняття рішень, випадковий ліс.*

Nataliya BOYKO
Candidate of Economical Sciences, Associate Professor, Associated Professor at the Department of Artificial Intelligence, Lviv Polytechnic National University, 12 Stepana Bandery str., Lviv, Ukraine, 79036, Nataliya.i.boyko@lpnu.ua
***ORCID:** 0000-0002-6962-9363*
***Scopus Author ID:** 57191967462*

Bohdan LEVYTSKYI
Student at the Department of Artificial Intelligence, Lviv Polytechnic National University, 12 Stepana Bandery str., Lviv, Ukraine, 79036, bohdan.levytskyi.knm.2018@lpnu.ua
***ORCID:** 0000-0002-0060-2381*

To cite this article: Boyko, N., Levytskyi, B. (2023). Algorytmy trenuvania ta otsinky modelei mashynnoho navchania dlia strykturovanoho naboru danykh [Algorithms of learning and evaluation of machine learning models of structured data sets]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security,* 3, 3–12, doi: https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-1

ALGORITHMS OF LEARNING AND EVALUATION OF MACHINE LEARNING MODELS OF STRUCTURED DATA SETS

The article deals with the sequential process of preliminary analysis and processing structured data about various types of construction vehicles. The algorithm for building machine learning models, in particular such as linear regression, decision tree and random forest, assessment of the quality of the obtained models and producing results is presented. The work describes research in the field of buying and selling cars on the secondary market using modern data mining technologies. The main objective of this study is to predict vehicle value using attributes highly correlated with price. It is proposed to consider the concepts of pricing by building the following machine learning models: taking into account the characteristics of specific brands of cars, taking into account the characteristics specific to certain types of vehicles, as well as a general model that includes all the characteristics available in the set. Models were built based on linear regression and decision tree methods. The purpose of selecting machine learning algorithms was to minimize errors in cost forecasting, speed of work, and ease of interpretation of the obtained results: based on which data the decision was made and which data have the most significant influence on the formation of the cost. To minimize the prediction error, detailed data analysis and preparation were carried out for each type of construction vehicle. Many experiments were conducted with various methods for finding and removing anomalous observations and for finding and using the essential features.

In contrast, such methods as Z-index, interquartile range, recursive removal of features, and feature search based on the detection of dependencies using statistical methods were used. A comparative analysis of the results of each of the models was carried out, and the possible reasons for specific results were analyzed. The problems that arise when solving this regression-type problem are presented – the selection of data that best summarizes the system of formation of the cost of a technical vehicle.

Key words: *machine learning, data, algorithm, data processing, machine learning regression models, linear regression, decision tree, random forest.*

Актуальність проблеми. Тема прогнозування вартості транспортних засобів є дуже популярною та піддавалася неодноразовому дослідженню зі сторони науковців та бізнесу. На це є кілька причин – бажання бізнесу передбачати тренди ринку, розуміти формування ціни на вторинному ринку продажу як вживаних транспортних засобів так і нових, тощо. Окрім бізнесу, звичайні громадяни також хочуть мати можливість дізнаватися об'єктивну вартість транспортного засобу, щоб, наприклад, не переплачувати або ж не втратити при продажу власного транспортного засобу. Відповідна тема є цікавою та постійно піддається дослідженню також через те, що економічний фон світу постійно змінюються, а разом з ним змінюються і тренди ринку, в тому числі вторинного ринку транспортних засобів (Massey F. J., 2021; Fushiki T., 2011).

У зв'язку з технічним прогресом та широким застосування техніки та транспортних засобів у найбільш різноманітних сферах та галузях людської діяльності, існує потреба у здійсненні аналізу ринків збуту транспортних засобів та можливості об'єктивної оцінки вартості (Leslie J. R., 2018). Саме тому, обрана тема є актуальною.

Метою дослідження є розробка модулів, що можуть взаємодіяти в інформаційній системі, та які виконують наступні функції: попередній аналіз та обробка структурованих даних про будівельні транспортні засоби різних типів, побудова моделей машинного навчання, зокрема таких як лінійна регресія, дерево прийняття рішень та випадковий ліс, оцінка якості отриманих моделей та продукуючих результатів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналізуючи наукові літературні джерела, було взято до уваги статті та наукові праці, що є схожими до теми дослідження або ж є дотичними до певних аспектів її виконання. Сюди належить – прогнозування вартості легкових транспортних засобів, аналіз транспортних засобів, застосування методів машинного навчання для передбачення ціни, зокрема застосування лінійної, багатовимірної регресії, застосування дерев рішень та використання комбінацій таких методів.

Метою дослідження (Pandey A., 2020; Sharma A. D., 2020) є отримання інформації про найбільш впливові фактори ціноутворення легкових автомобілів. Автори виділяють 5 основних кроків – дослідження ринку та отриманих з нього даних, чистка та підготовка даних, обрання ознак з використанням методу RFE, побудова та оцінка отриманої моделі лінійної

регресії. Значна увага приділяється аналізу кореляцій між залежною ознакою – ціною та незалежними ознаками, а також аналізу кореляції незалежних ознак, які можуть негативно вплинути на остаточну побудовану модель.

У статті (Chen C., 2017; Asghar M., 2021) описано недоліки застосування лінійних моделей для прогнозування цін у зв'язку з тим, що ціна у світі формується за впливу багатьох факторів. Відповідно нелінійні моделі краще прогнозують довільне ціноутворення в реальному житті. Дослідники також пропонують використати S-Curve модель, як альтернативну нелінійну модель для оцінювання вартості вживаних автомобілів.

У статті (Karakoç M. M., 2019; Samruddhi K.) дослідники застосовують лінійну регресію, дерева рішень, та випадковий ліс для прогнозування ціни на авто. Особливість їхнього методу побудови полягає в попередній обробці даних. Автори заповнюють такі пусті значення на основі групування та аналізу даних груп авто, які є схожі на авто з пустим значенням. Для кластеризації груп схожих за характеристиками авто було використано алгоритм кластеризації K-means.

Визначення мети дослідження. Основною метою даної роботи є побудова моделей машинного навчання, яка буде надавати можливість користувачу оцінювати вартість специфічних будівельних транспортних засобів на основі певних технічних та експлуатаційних характеристик.

Виклад основного матеріалу дослідження. Існує багато варіацій алгоритмів методів відбору ознак, які побудовані на основі тренування моделей машинного навчання або ж застосування статистичних методів для статичного аналізу даних.

Дуже важливим етапом, який може значно вплинути на якість моделі є пошук та вилучення викидів. Для боротьби з ними існує ряд статистичних методів, що дозволяють в автоматичному режимі виявити їх (Mammadov H., 2021; Chen C., 2017).

Z-index – ефективний спосіб визначення викидів у наборі даних, якщо набір даних відповідає нормальному розподілу. Z-index кожного спостереження в наборі даних можна обчислити, використовуючи наступну формулу 1:

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma}, \qquad (1)$$

де X – вихідне значення спостереження;

μ – середнє значення нормально розподіленого набору даних;

σ – стандартне відхилення нормально розподіленого набору даних.

Z-index є простим, інтуїтивно зрозумілим та в той же час ефективним методом для виявлення викидів, але його можна застосовувати у випадку нормально розподілених даних. Якщо ж дані не відповідають нормальному розподілу, можна використати ще одним метод, який називається міжквартильний розмах (IQR), який схожий на Z-index та побудована на принципі поділу даних на квантилі.

Модель машинного навчання – це абстракція, яка містить під собою певний алгоритм машинного навчання, що тренується на основі певних даних. Ряд таких алгоритмів є душе широким та може використовувати у своїй роботі різні підходи та різні структури даних.

Лінійна регресія – один з найпростіших алгоритмів машинного навчання, який здатний вирішувати проблему регресії. Побудована модель встановлює залежність між скалярним значенням y та вектором незалежних ознак X. Загальна формула лінійної регресії має наступний вигляд (Формула 2):

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 \ldots + a_n x_n . \qquad (2)$$

Для перевірки адекватності та якості побудованої моделі лінійної регресії достатньо перевірити наступні припущення:

1. Наявність лінійної залежності між залежною та незалежними змінними. Перевірити дану гіпотезу можна наступним чином:

1) Побудувати візуальні графіки діаграми розсіювання та оцінити наявність лінійної залежності;

2) Обрахувати коефіцієнт кореляції Пірсона, який дозволяє оцінити залежність. Коефіцієнт кореляції Пірсона здатний набувати значення в межах від -1 до 1. Абсолютне значення отриманого коефіцієнта кореляції свідчить про значущість лінійної залежності та чим більше це значення – тим сильніша залежність. Знак коефіцієнта кореляції пояснює напрям залежності: позитивний знак означає зростання залежної змінної при зростанні незалежної, від'ємний – спадання залежної змінної при зростанні незалежної.

2. Відсутність мультиколінеарності: незалежні змінні не повинні корелювати між собою, незалежна змінна має мати кореляцію тільки з залежною змінною. Якщо ця гіпотеза не виконуються, це може негативно вплинути на побудовану модель лінійної регресії, оскільки алгоритм не може визначити, яка саме з мультиколінеарних незалежних змінних впливає на формування залежної змінної та з яким ваговим коефіцієнтом.

3. Гомоскедастичність. Це означає, що дисперсія залишків повинна має бути сталою.

4. Значення залишків не повинні корелювати між собою.

Дерево рішень – модель машинного навчання, яка будує дерево специфічної структури для прогнозування. В такій структурі дерева вузол представляє атрибути за якими приймалося рішення, зв'язок – значення атрибуті, на основі яких приймалося рішення від яких залежить цільова функція, листок – значення залежної змінної. Математично дерево рішення можна представити функцією, що приймає на вхід вектор атрибутів $x_1, x_2, \ldots x_n$, а на вихід видає значення y.

Випадковий ліс – один з простих та популярних методів машинного навчання, який використовує ансамблювання. Даний алгоритм працює з використанням bagging принципу. В якості моделі машинного навчання випадковий ліс використовує дерева прийняття рішення. Дерева прийняття рішення мають особливість часто перенавчатися, тому саме техніка ансамблювання має здатність зменшити вплив перенавчання на вихідний результат та покращити якість вихідної моделі.

Універсального правила для підбору оптимальних гіперпараметрів не існує. Найкращим способом щоб це зробити – проведення експериментів з підбору параметрів для мінімізації помилки на тестувальному наборі даних.

Експериментальна частина. Побудова моделі машинного навчання починається з підготовки набору даних, який буде використано для тренування та оцінки результатів. Такий набір даних було попередньо зібрано. Він містить інформацію про технічні та експлуатаційні характеристики міні-вантажників.

Аналіз та побудова моделі машинного навчання розпочинається з загального огляду набору даних (рис. 1).

Набір даних містить 57675 записів спостережень різних моделей міні-вантажників з доволі великим розкидом ціни. Також він містить багато незалежних: як категоріальних так і числових атрибутів, серед яких необхідно виділити ті, які впливають на формування вартості ціни. Для того, щоб відшукати певні залежності між двома атрибутами використовується показник кореляції. Побудуємо матрицю кореляцій для відповідного набору даних (рис. 2).

Аналізуючи отриману матрицю, можна одразу помітити, що атрибут ціни корелює з багатьма іншими атрибутами. Серед основних таких атрибутів міні-вантажника можна виділити: номінальну робочу потужність, вагу, габарити технічного засобу та його вік. Також серед атрибутів є такі важливі характеристики, як максимальна висота підйому та час експлуатації засобу в годинах, проте показник кореляції є малим та не свідчить про якусь залежність.

Дуже важливим для аналізу даних є їх візуальне представлення. Для аналізу залежностей двох атрибутів ідеальним способом представлення даних є побудова точкової діаграми. Точкова діаграма це графік, що відображає значення 2 атрибутів з набору даних у вигляді точок, де значення кожного з атрибутів визначає положення цієї точки. Представимо залежності ціни з іншими атрибутами (рис. 3).

Аналізуючи отримані графіки, одразу можна побачити, що в зібраному наборі даних присутні викиди у значеннях різних атрибутів даних. Тому перш ніж робити певні висновки про важливість атрибутів необхідно позбутися цих викидів та повернутися до подальшого аналізу.

Стратегія пошуку викидів залежить від природи розподілу атрибуту. У випадку нормально розподіленого атрибуту доцільно використовувати алгоритм пошуку та видалення викиду, базуючись на Z-index значенні, інакше – використовувати інший метод, побудований на принципі міжквартильного розкиду.

Рис. 1. Початковий набір даних

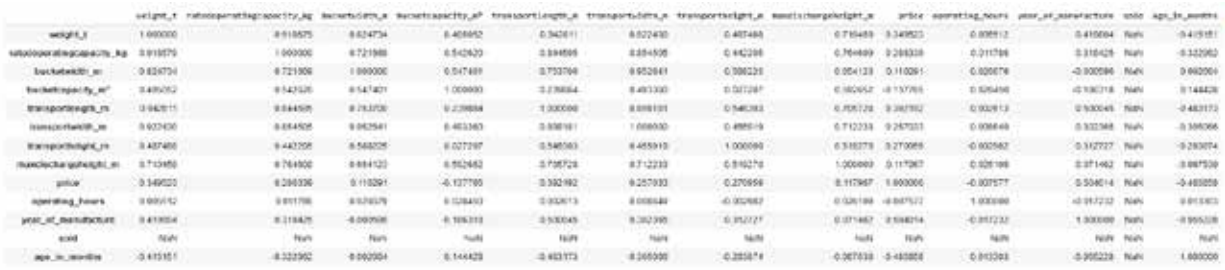


Рис. 2. Матриця кореляцій ознак

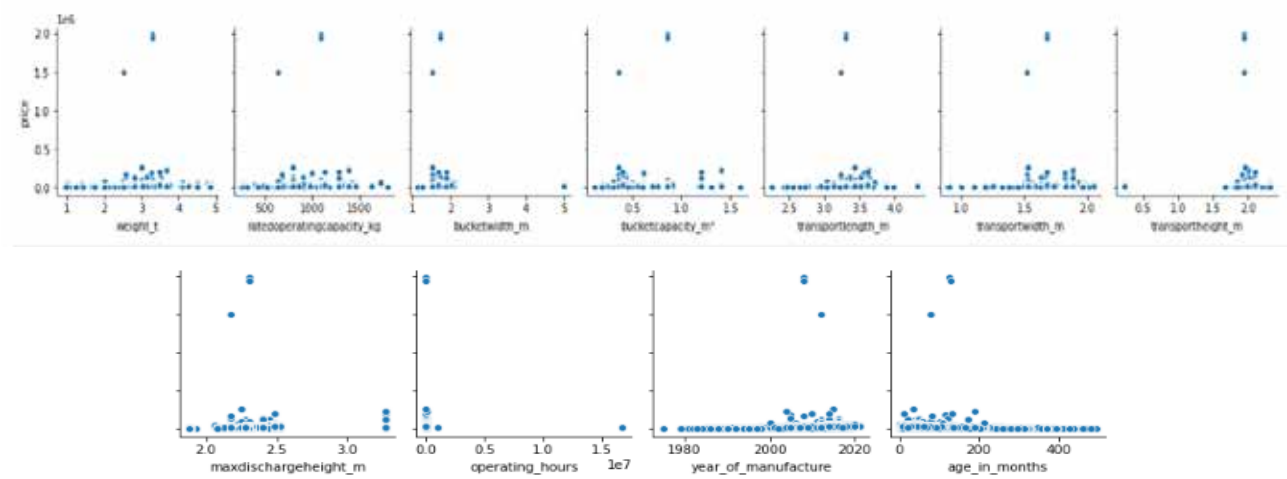


Рис. 3. Візуальне представлення залежності атрибутів з використанням точкової діаграми

Для того щоб визначити, чи дані підлягають під визначення нормального розподілу, існує кілька шляхів. Популярними способами перевірки даних на нормальність є побудова відповідних графіків та візуальна оцінка. Для того щоб визначити нормальність розподілу, можна побудувати наступні діаграми: гістограма розподілу (рис. 4), коробковий графік (рис. 5) або ж Q-Q графіки (рис. 6). При аналізі коробкового графіку також можна виявити наявність викидів (рис. 5).

Це є доволі ефективні способи перевірки розподілу даних на нормальність, які не підлягають автоматизації, а також допускають здійснення помилки оцінювання користувачем, оскільки оцінювання графіків є суб'єктивним.

Для побудови моделі машинного навчання ми використали 3 різні алгоритми, про які згадувалося раніше – лінійну регресію, дерево рішень та випадковий ліс. Саме ці алгоритми є швидкими та в той же час ефективними для вирішення такого типу задач та піддаються легкій інтерпретації

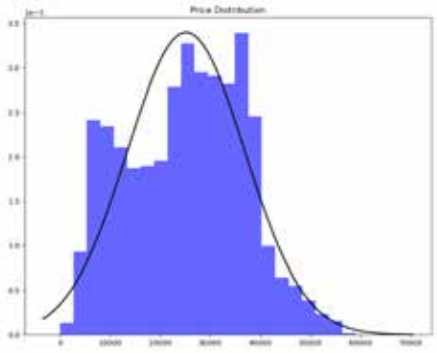


Рис. 4. Гістограма розподілу ціни у порівнянні з теоретичним нормальним розподілом

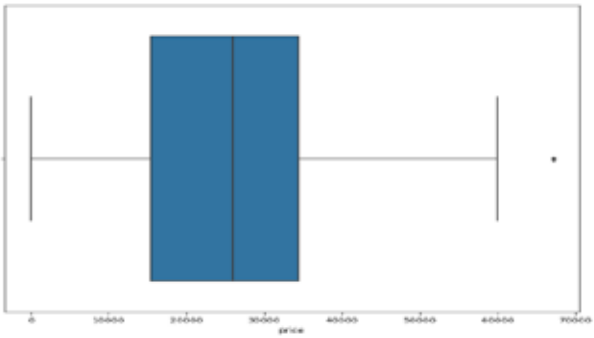


Рис. 5. Коробкова діаграма розподілу ціни

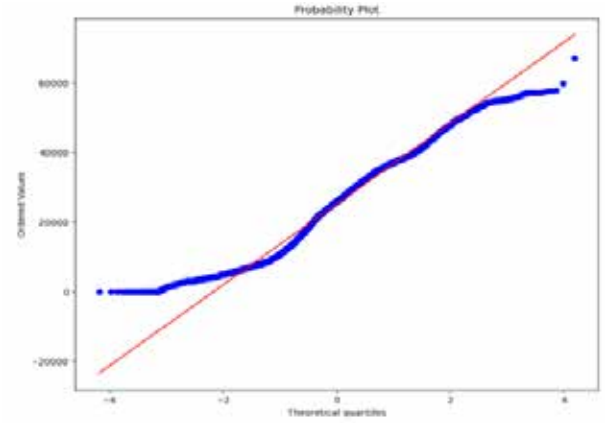


Рис. 6. Q-Q графік розподілу ціни у порівнянні з теоретичним нормальним розподілом

результатів. Проте, перш ніж будувати модель необхідно визначити, які саме атрибути набору даних будуть використовуватися в процесі тренування та будуть найбільш ефективними. Для цього існують алгоритми відбору ознак.

В якості алгоритму відбору ознак слід використати алгоритм рекурсивного видалення ознак, що належать до обгорткових методів відбору ознак. В якості моделі, що буде використовуватися для відбору ознак, виберемо модель дерева рішень.

Отож, будемо будувати послідовно кілька моделей машинного навчання одного типу, видаляючи при цьому по одній найменш впливовій ознаці з вхідного набору даних.

Для об'єктивної оцінки якості побудованої моделі машинного навчання було вирішено використовувати алгоритм k-кратного перехресного затверджування [4]. Даний алгоритм розділяє первинний вхідний набір даних на k піднаборів однакової розмірності. З k піднаборів даних алгоритм обирає один та використовує його як тестувальний набір для оцінки натренованої моделі, а інші k-1 піднаборів – використовуються в етапі тренування моделі машинного навчання. Згодом процес перехресного затверджування повторюється ще k разів, при цьому обираючи один з піднаборів даних як тестувальний, а інші – як тренувальні. Таким чином ми отримує k оціночних результатів тренування-тестування моделі, які можемо

Таблиця 1

Результати тренування та оцінки лінійної регресії

Features	Train				Test			
	MAE	MSE	RMSE	R^2	MAE	MSE	RMSE	R^2
Підйомна сила	6293.212 +- 9.253	65442848.551 +- 184877.439	8089.667 +- 11.427	0.070 +- 0.001	6293.645 +- 73.149	65460029.696 +- 1663143.458	8090.084 +- 102.799	0.070 +- 0.013
Підйомна сила Вік транспортного засобу	5465.657 +- 7.957	46531041.425 +- 111916.565	6821.362 +- 8.205	0.339 +- 0.002	5466.116 +- 70.216	46539009.562 +- 1006614.740	6821.553 +- 73.662	0.338 +- 0.015
Підйомна сила Вік транспортного засобу Експлуатаційні години	5465.486 +- 7.976	46526121.105 +- 112374.35	6821.001 +- 8.239	0.339 +- 0.002	5466.118 +- 70.304	46536284.822 +- 1011098.339	6821.350 +- 73.983	0.339 +- 0.015
Підйомна сила Вік транспортного засобу Експлуатаційні години Вага	5433.364 +- 7.973	46218350.414 +- 111012.505	6798.403 +- 8.167	0.343 +- 0.002	5434.160 +- 71.160	46230035.460 +- 999161.210	6798.872 +- 73.324	0.343 +- 0.014
Підйомна сила Вік транспортного засобу Експлуатаційні години Вага Номінальна потужність	4712.154 +- 6.823	35921980.793 +- 106659.796	5993.488 +- 8.905	0.490 +- 0.002	4713.033 +- 59.820	35934788.235 +- 959968.876	5994.036 +- 79.533	0.489 +-0.014
Підйомна сила Вік транспортного засобу Експлуатаційні години Вага Номінальна потужність Максимальна підйомна висота	4712.149 +- 6.821	35921791.950 +- 106659.224	5993.473 +-8.905	0.490 +- 0.002	4713.175 +- 59.825	35936468.463 +- 959769.522	5994.176 +- 79.516	0.489 +- 0.014
Підйомна сила Вік транспортного засобу Експлуатаційні характеристика Вага Номінальна потужність Максимальна підйомна висота Об'єм ковша	4595.790 +- 6.675	34858125.505 +- 102213.394	5904.071 +- 8.661	0.505 +- 0.001	4596.971 +- 58.895	34875773.531 +- 919794.691	5905.062 +- 77.547	0.504 +- 0.013

в подальшому агрегувати. Такий підхід дозволяє уникнути помилкових оцінок моделі, яка натренувалася на “щасливому” наборі даних, який показує найкращий результат і дає нам можливість усереднити результат на сукупній вибірці.

Отож було проведення тренування та оцінка вищезгаданих алгоритмів машинного навчання на наборі даних міні-вантажників. Відповідні результати представлені у вигляді таблиць нижче: лінійна регресія (табл. 1), дерево рішень (табл. 2), випадковий ліс (табл. 3).

Аналізуючи отримані результати можна зробити висновок, що випадковий ліс впорався з поставленою задачею найкраще та показує доволі хороші результати.

Таким чином випадковий ліс показує середню абсолютну похибку 3000 на тестувальному та 2100 на тренувальному наборі даних (табл. 3). Коефіцієнт детермінації також є хорошим – 0.79 та 0.7 для тренувальної та тестувальної вибірки, що означає, що дана модель є адекватною та доволі якісно описує загальну вибірку даних.

Дерево рішень – показує посередні результати. 3200 та 1900 на тестувальній та тренувальній вибірці, а коефіцієнт детермінації – 0.8 та 0.65 відповідно (табл. 2). Також за результатами тренування та оцінки якості моделі можна помітити, що модель дерева рішень піддається перенавчанню на тренувальній вибірці. Це власне і є основна проблема даного алгоритму.

Лінійна регресія показала найменш точні результати серед обраних та тренованих моделей машинного навчання. Її показники були наступними – 4595 та 4596 для тренувальної та тестувальної вибірки, а коефіцієнт детермінації склав 0.5 для обидвох (табл. 1). Таким чином лінійна регресія не піддалася перенавчанню на тренувальному наборі даних, але сама не дозволяє описати природу залежностей відповідного набору даних. Спостереження вибірки є доволі розкиданими та можливо місять певні нелінійні залежності, які лінійна регресія задовільнити не може.

Окрім набору даних, що містить інформацію про міні-вантажники, було також зібрано вибірку з інформацією про міні-екскаватори.

Таблиця 2

Результати тренування та оцінки дерева рішень

Features	Train				Test			
	MAE	MSE	RMSE	R2	MAE	MSE	RMSE	R2
Підйомна сила	5370.066 +- 41.205	45106510.157 +- 813098.940	6715.867 +- 60.309	0.359 +- 0.011	5371.452 +- 82.583	45135372.166 +- 1264421.932	6717.631 +- 93.861	0.358 +- 0.021
Підйомна сила Вік транспортного засобу	4139.388 +- 29.796	29205102.875 +- 283522.107	5404.111 +- 26.191	0.585 +- 0.004	4220.810 +- 62.135	30122660.667 +- 948910.096	5487.741 +- 85.812	0.572 +- 0.012
Підйомна сила Вік транспортного засобу Експлуатаційні години	1991.326 +- 22.793	13866846.254 +- 132301.988	3723.779 +- 17.740	0.803 +- 0.002	0.004 +- 67.973	24627498.323 +- 1028281.471	4961.530 +- 103.526	0.650 +- 0.015
Підйомна сила Вік транспортного засобу Експлуатаційні години Вага	1977.431 +- 5.645	13796859.235 +- 66602.690	3714.402 +- 8.976	0.804 +- 0.001	3174.007 +- 61.837	24532473.849 +- 974267.995	4952.047 +- 98.504	0.651 +-0.014
Підйомна сила Вік транспортного засобу Експлуатаційні години Вага Номінальна потужність	1977.431 +- 5.645	13796859.235 +- 66602.690	3714.402 +- 8.976	0.804 +- 0.001	3172.893 +- 59.523	24534251.369 +- 934127.440	4952.307 +- 94.400	0.651 +-0.013
Підйомна сила Вік транспортного засобу Експлуатаційні години Вага Номінальна потужність Максимальна підйомна висота	1977.431 +- 5.645	13796859.235 +- 66602.690	3714.402 +- 8.976	0.804 +- 0.001	3174.043 +- 58.777	24565235.683 +-935534.464	4955.430 +- 94.586	0.651 +- 0.014
Підйомна сила Вік транспортного засобу Експлуатаційні характеристика Вага Номінальна потужність Максимальна підйомна висота Об’єм ковша	1977.431 +- 5.645	13796859.235 +- 66602.690	3714.402 +- 8.976	0.804 +- 0.001	3174.375 +- 57.040	24549672.483 +- 920909.236	4953.889 +- 93.043	0.651 +- 0.014

Таблиця 3

Результати тренування та оцінки випадкового лісу

Features	Train				Test			
	MAE	**MSE**	**RMSE**	**R2**	**MAE**	**MSE**	**RMSE**	**R2**
Підйомна сила	5378.565 +- 45.176	45275751.220 +- 875025.68	6728.413 +- 64.904	0.357 +- 0.013	5382.977 +- 76.338	45347582.833 +- 1213065.022	6733.460 +- 90.014	0.355 +- 0.016
Підйомна сила Вік транспортного засобу	4137.263 +- 26.598	29158564.515 +- 270105.054	5399.810 +- 24.935	0.586 +- 0.004	4214.393 +- 58.268	30039185.418 +- 900312.558	5480.198 +- 81.323	0.573 +- 0.012
Підйомна сила Вік транспортного засобу Експлуатаційні години	2357.318 +- 17.910	14737814.210 +- 107742.117	3838.961 +- 14.010	0.791 +- 0.001	3090.553 +- 54.758	21224145.439 +- 749433.857	4606.256 +- 80.911	0.698 +- 0.011
Підйомна сила Вік транспортного засобу Експлуатаційні години Вага	2351.151 +- 5.783	14707156.196 +- 66646.522	3834.981 +- 8.697	0.791 +- 0.001	3081.015 +- 57.240	21153848.877 +- 804216.659	4598.508 +- 87.033	0.699 +- 0.012
Підйомна сила Вік транспортного засобу Експлуатаційні години Вага Номінальна потужність	2351.265 +- 5.798	14708204.877 +- 67275.425	3835.118 +- 8.780	0.791 +- 0.001	3082.581 +- 56.649	21159954.561 +- 796869.75	4599.187 +- 86.233	0.699 +- 0.012
Підйомна сила Вік транспортного засобу Експлуатаційні години Вага Номінальна потужність Максимальна підйомна висота	2351.178 +- 5.472	14708979.438 +- 66814.503	3835.219 +- 8.719	0.791 +- 0.001	3081.406 +- 56.880	21153321.615 +- 791325.308	4598.476 +- 85.665	0.699 +- 0.011
Підйомна сила Вік транспортного засобу Експлуатаційні характеристика Вага Номінальна потужність Максимальна підйомна висота Об'єм ковша	2351.026 +- 5.996	14708228.258 +- 68283.570	3835.120 +- 8.912	0.791 +- 0.001	3081.759 +- 54.814	21151557.368 +- 781739.460	4598.303 +- 84.656	0.699 +- 0.011

Таблиця 4

Найкращі результати тренування та оцінки моделей машинного навчання для набору даних міні-екскаваторів

Модель	Train				Test			
	MAE	MSE	RMSE	R^2	MAE	MSE	RMSE	R^2
Лінійна регресія	4620.016 +- 19.371	39700909.275 +- 360633.978	6300.801 +- 28.636	0.574 +- 0.003	4626.739 +- 169.046	39812037.807 +- 3243015.909	6304.476 +- 256.170	0.572 +- 0.026
Дерево рішень	235.933 +- 7.434	913381.498 +- 52533.676	955.310 +- 27.660	0.990 +- 0.001	3549.773 +- 256.752	41144201.893 +- 6822245.189	6392.429 +- 530.139	0.557 +- 0.071
Випадковий ліс	1238.417 +- 13.583	4194736.099 +- 111487.911	2047.926 +- 27.133	0.915 +- 0.001	3070.881 +- 215.310	25501721.283 +- 4138073.619	5033.298 +- 409.434	0.726 +- 0.039

Цей набір даних був значно менший, аніж міні-вантажники та містив 4038 спостережень після видалення викидів та обробки пустих значень. Він також містив доволі багато атрибутів, проте після аналізу залишились тільки найважливіші – вага, об'єм ковша, ширина бази, максимальна, глибина копання, сила копання, потужність двигуна, кількість експлуатаційних годин та рік виробництва.

Після проведення тренування та оцінки отриманий моделей машинного навчання, були отримані такі найкращі результати (табл. 4).

Отримані результати є доволі схожими на попередні. Лінійна регресія показала найгірші результати з коефіцієнтом детермінації 0.572. Це означає, що лінійна регресія не здатна описати природу походження та залежностей даних.

Аналізуючи тренувальні та тестувальні оцінки дерева рішень, можна зробити висновок, що під час тренування модель піддалася сильному перенавчанню, оскільки тренувальні коефіцієнт детермінації є надзвичайно високим, а похибки є надзвичайно малими, а тестувальні навпаки. Таку модель використовувати не можна, оскільки вона не узагальнює існуючі залежності та відповідно буде давати помилкові результати.

Випадковий ліс – оптимальна серед трьох натренованих моделей, оскільки результати на тестувальних вибірках в середньому становлять 3000 абсолютної похибки, а коефіцієнт детермінації – 0.726, що означає, що модель достатньо добре пояснює існуючі залежності. Тренувальна оцінка є значно кращою, ніж тестувальна, що також свідчить про наявність перенавчання.

Метою відбору алгоритмів машинного навчання була мінімізація похибок при прогнозуванні вартості, швидкість роботи, легкість інтерпретації отриманих результатів: на основі яких даних приймалося рішення та які дані найбільше впливають на формування вартості. Тому вибрано та проведено експерименти з використанням трьох моделей – лінійної регресії, дерева рішень та випадкового лісу, останній з яких показав найбільш точні та стабільні результати.

Висновки. Також для мінімізації похибки прогнозування було проведено детальний аналіз даних та їх підготовку для кожного типу будівельного транспортного засобу. Такі дії важко піддаються автоматизацію та вимагають попереднього аналізу людиною, щоб мінімізувати фактори, що можуть негативно повпливати на подальші результати та уникнути видалення реальних спостережень з набору даних. Було проведено багато експериментів з різними методами для пошуку та видалення аномальних спостережень, для пошуку та використання найбільш важливих ознак, при цьому використовувалися такі методи як Z-index, міжквартильний розмах, рекурсивне видалення ознак, пошук ознак на основі виявлення залежностей з використанням статистичних методів, тощо.

Фінальні результати, що були отримані в результаті експериментів у проведенні аналізу даних та побудови регресійних моделей, були доволі точними – середня абсолютна похибка для різних наборів даних склала близько 3000, що є хорошим показником та може бути пояснена відповідним розкидом цін на ринку. Було проведено порівняльний аналіз результатів кожної з моделей, проаналізовано можливі причини тих чи інших результатів.

Основна проблема при вирішенні даної задачі регресійного типу – відбір даних, що якнайкраще узагальнюють систему формування вартості технічного транспортного засобу. Оскільки дані були зібрані з реальних платформ розміщення оголошень про продаж таких транспортних засобів, відповідно прогнозований результат може бути з певною похибкою, оскільки присутня суб'єктивна оцінка вартості транспортних засобів їх власником.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Massey F. J. The Kolmogorov-Smirnov Test for Goodness of Fit. *Journal of the American Statistical Association. 2021. № 46 (253).* P. 68–78. DOI: 10.1080/01621459.1951.10500769.

2. Leslie J. R., Stephens M. A., Fotopoulos S. Asymptotic Distribution of the Shapiro-Wilk W for Testing for Normality. *Ann. Statist.2018. № 14(4).* P. 214-224. DOI: 10.1214/aos/1176350172.

3. Fushiki T. Estimation of prediction error by using K-fold cross-validation. *Stat Comput. 2011. № 21(2)*. P. 137–146. DOI: 10.1007/s11222-009-9153-8.

4. Mammadov H. Car Price Prediction in the USA by using Liner Regression. *International Journal of Economic Behavior (IJEB). 2021. № 11(1).* P. 56-68. DOI: 10.14276/2285-0430.3049.

5. Pandey A., Rastogi V., Singh S. Car's Selling Price Prediction using Random Forest Machine Learning Algorithm. *SSRN Journal. 2020. № 1.* P. 146-159. DOI: 10.2139/ssrn.3702236.

6. Fadzilah S. Nur A. A. Used Car Price Estimation: Moving from Linear Regression towards a New S-Curve Model. *IJBS.2021. № 22(3).* P. 1174–1187. DOI: 10.33736/ijbs.4293.2021.

7. Chen C., Hao L., Xu C. Comparative analysis of used car price evaluation models. *Hangzhou. 2017. № 1.* P.201-210. DOI: 10.1063/1.4982530.

8. Sharma A. D., Sharma V., Mittal S., Jain G., Narang S. Predictive analysis of used car prices using machine learning. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science. 2020. № 3(6).* P. 11-20.

9. Chen Y., Li C., Xu M. Business Analytics for Used Car Price Prediction with Statistical Models. *3rd International Conference on Economic Management and Cultural Industry (ICEMCI 2021), Guangzhou, China, 2021.* P. 20-32. DOI: 10.2991/assehr.k.211209.090.

10. Karakoç M. M., ÇeliK G., Varol A. Car Price Prediction Using An Artificial Neural Network. *2019. № 2*. P. 5-19.

11. Samruddhi K., Ashok Kumar R. Used Car Price Prediction using K-Nearest Neighbor Based Model. *International Journal of Innovative Research in Applied Sciences and Engineering. 2020. № 4(3)*. P. 686–689. DOI: 10.29027/IJIRASE.v4.i3.2020.686-689.

12. Asghar M., Mehmood K., Yasin S., and Khan Z., Used Cars Price Prediction using Machine Learning with Optimal Features. *Pakistan Journal of Engineering and Technology*. *2021. vol. 4, no. 2*. P. 113-119.

REFERENCES:

1. Massey F. J. (2021). The Kolmogorov-Smirnov Test for Goodness of Fit. *Journal of the American Statistical Association. № 46 (253).* P. 68–78. DOI: 10.1080/01621459.1951.10500769.

2. Leslie J. R., Stephens M. A., Fotopoulos S. (2018). Asymptotic Distribution of the Shapiro-Wilk W for Testing for Normality. *Ann. Statist. № 14(4).* P. 214-224. DOI: 10.1214/aos/1176350172.

3. Fushiki T. (2011). Estimation of prediction error by using K-fold cross-validation. *Stat Comput. № 21(2)*. P. 137–146. DOI: 10.1007/s11222-009-9153-8.

4. Mammadov H. (2021). Car Price Prediction in the USA by using Liner Regression. *International Journal of Economic Behavior (IJEB). № 11(1).* P. 56-68. DOI: 10.14276/2285-0430.3049.

5. Pandey A., Rastogi V., Singh S. (2020). Car's Selling Price Prediction using Random Forest Machine Learning Algorithm. *SSRN Journal. № 1.* P. 146-159. DOI: 10.2139/ssrn.3702236.

6. Fadzilah S. Nur A. A. (2021). Used Car Price Estimation: Moving from Linear Regression towards a New S-Curve Model. *IJBS. № 22(3).* P. 1174–1187. DOI: 10.33736/ijbs.4293.2021.

7. Chen C., Hao L., Xu C. (2017). Comparative analysis of used car price evaluation models. *Hangzhou. № 1.* P.201-210. DOI: 10.1063/1.4982530.

8. Sharma A. D., Sharma V., Mittal S., Jain G., Narang S. (2020). Predictive analysis of used car prices using machine learning. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science. № 3(6).* P. 11-20.

9. Chen Y., Li C., Xu M. (2021). Business Analytics for Used Car Price Prediction with Statistical Models. *3rd International Conference on Economic Management and Cultural Industry (ICEMCI 2021), Guangzhou, China.* P. 20-32. DOI: 10.2991/assehr.k.211209.090.

10. Karakoç M. M., ÇeliK G., Varol A. (2019). Car Price Prediction Using An Artificial Neural Network. *№ 2*. P. 5-19.

11. Samruddhi K., Ashok Kumar R. (2020). Used Car Price Prediction using K-Nearest Neighbor Based Model. *International Journal of Innovative Research in Applied Sciences and Engineering. № 4(3).* P. 686–689. DOI: 10.29027/IJIRASE.v4.i3.2020.686-689.

12. Asghar M., Mehmood K., Yasin S., and Khan Z. (2021). Used Cars Price Prediction using Machine Learning with Optimal Features. *Pakistan Journal of Engineering and Technology*. *vol. 4, no. 2*. P. 113-119.

УДК 519.85:629.039.58
DOI https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-2

Сергій ДЗЮБА
доктор технічних наук, старший науковий співробітник, учений секретар, Придніпровський науковий центр НАН України та МОН України, вул. Сімферопольська, 2-А, м. Дніпро, Україна, 49005, office.psc@nas.gov.ua
ORCID: *0000-0002-3139-2989*
Scopus Author ID: *57209565553*

Лариса КОРЯШКІНА
кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри системного аналізу і управління, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького 19, м. Дніпро, Україна, 49005, koriashkina.l.s@nmu.one
ORCID: *0000-0001-6423-092X*
Scopus Author ID: *55844269100*

Ольга СТАНІНА
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри системного аналізу і управління, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького 19, м. Дніпро, Україна, 49005, stanina.o.d@nmu.one
ORCID: *0000-0001-6754-0317*
Scopus Author ID: *57203935767*

Данило ЛУБЕНЕЦЬ
аспірант кафедри системного аналізу і управління, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького 19, м. Дніпро, Україна, 49005, stanina.o.d@nmu.one
ORCID: *0009-0000-8563-3760*

Бібліографічний опис статті: Дзюба, С., Коряшкіна, Л., Станіна, О., Лубенець, Д. (2023). Математичні моделі оптимізаційних задач частково-двоетапної евакуації населення із зонуванням постраждалої території. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security,* 3, 13–21, doi: https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-2

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЙНИХ ЗАДАЧ ЧАСТКОВО-ДВОЕТАПНОЇ ЕВАКУАЦІЇ НАСЕЛЕННЯ ІЗ ЗОНУВАННЯМ РЕГІОНУ

Розроблено нові моделі і методи розв'язання двоетапних задач оптимального розбиття множин з додатковими зв'язками, які на відміну від існуючих, враховують доставку частини неперервно розподіленого ресурсу безпосередньо до кінцевих пунктів, пропускаючи етап його збору в первинному пункті. Це дозволило, наприклад, під час опису евакуаційних процесів взяти до уваги те, що у частини населення, постраждалої від надзвичайної ситуації регіону, є свій власний транспорт і вона в змозі дістатися пунктів призначення (центрів другого етапу) самостійно, а решта евакуюється через проміжні пункти збору. Крім того, в запропонованій моделі враховано наявний парк автомобільних транспортних засобів, їх характеристики, вартість використання.

Ключові слова: *гуманітарна логістика, зони евакуації, системи аварійної логістики, аналіз, математичне моделювання, неперервна задача оптимального розбиття множин, дворівневе розбиття.*

Serhii DZIUBA
Doctor of Technical Science, Senior Scientific Associate, Scientist Secretary, Pridniprovsky Scientific Center of the National Academy of Sciences of Ukraine and of Ministry of Education and Science of Ukraine, 2-A Simferopilska str., Dnipro, Ukraine, 49005, office.psc@nas.gov.ua
ORCID: *0000-0002-3139-2989*
Scopus Author ID: *57209565553*

Larysa KORIASHKINA
PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of System Analysis and Control, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho ave., Dnipro, Ukraine, 49005, koriashkina.l.s@nmu.one
***ORCID:** 0000-0001-6423-092X*
***Scopus Author ID:** 55844269100*

Olha STANINA
PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of System Analysis and Control, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho ave., Dnipro, Ukraine, 49005, stanina.o.d@nmu.one
***ORCID:** 0000-0001-6754-0317*
***Scopus Author ID:** 57203935767*

Danylo LUBENETS
Postgraduate Student of the Department of System Analysis and Control, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho ave., Dnipro, Ukraine, 49005, stanina.o.d@nmu.one
***ORCID:** 0009-0000-8563-3760*

To cite this article: Dziuba, S., Koriashkina, L., Stanina, O., Lubenets, D. (2023). Matematychni modeli optymizatsiinykh zadach chastkovo-dvoetapnoi evakuatsii naselennia iz zonuvanniam postrazhdaloi terytorii [Mathematical models of optimization problems of partially two-stage population evacuation with territory segmentation]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security,* 3, 13–21*,* doi: https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-2

MATHEMATICAL MODELS OF OPTIMIZATION PROBLEMS OF PARTIALLY TWO-STAGE POPULATION EVACUATION WITH TERRITORY SEGMENTATION

The paper presents a new models and methods for solving two-stage problems of optimal partitioning of sets with additional connections, which, unlike the existing ones, consider the delivery of a part of a continuously distributed resource directly to the final points, skipping the stage of its collection at the primary point. This make it possible, for example, during the description of the evacuation processes to take into account that part of the affected region population has its own transport and is able to reach the destinations (centers of the second stage) independently, while the rest is evacuated through intermediate collection points. In addition, the proposed model considers the available fleet of motor vehicles, their characteristics, and the cost of use.

***Key words:** humanitarian logistics, evacuation zones, emergency logistics systems, analysis, mathematical modeling, continuous problem of optimal partitioning of sets, two-level partitioning.*

Вступ. Значущим напрямком наукових досліджень в галузі безпеки життєдіяльності нині є гуманітарна логістика. Вона вивчає проблеми, пов'язані з потенційними надзвичайними ситуаціями природного або техногенного характеру, розробляє операції щодо усунення цих проблем і управління діями у разі реальної катастрофи.

В гуманітарній логістиці важливе місце займає система досліджень і знань, що вивчає питання раціональної організації евакуаційних процесів, планування руху матеріальних і людських потоків під час надзвичайної ситуації. Цей напрям наукових досліджень будемо називати екстреною логістикою з оглядом на екстрений характер більшості дій і заходів щодо запобігання або ліквідації наслідків від стихійних лих або техногенних аварій.

У прикладному значенні екстрену логістику будемо сприймати як інтегрований процес, покликаний сприяти зменшенню масштабів та збитків при подоланні катастроф за рахунок профілактики, раннього попередження, мінімізації сумарних втрат, загальних транспортних і організаційних витрат та наслідків від надзвичайної ситуації. Значення екстреної логістики зростає зі збільшенням кількості природних катаклізмів та локальних воєнних конфліктів, які супроводжуються пожежами, вибухами, затопленнями й іншими негативними наслідками, завдають суспільству суттєві матеріальні та соціальні збитки. Збільшення ризику виникнення аварійних ситуацій за рахунок зношуваності основних фондів об'єктів інфраструктури та недостатнього рівня їх фізичного захисту також обумовлює актуальність досліджень в області екстреної логістики.

Сукупність форм, методів і правил організації та управління матеріальними або людськими потоками під час надзвичайних ситуацій формують систему екстреної логістики (СЕЛ). Вона включає підсистеми трьох рівнів:

– елементного – які забезпечують узгоджене та ефективне функціонування основних ланок логістичного ланцюга (первинні пункти збору, склади, аварійні служби та транспорт);

– функціонального – що відповідають за організацію матеріальних або людських потоків, управління заготівками, організація правового та інформаційного забезпечення логістичних рішень;

– інтеграційного – які об'єднують усі групи операцій у єдиний процес.

Мета даної роботи – забезпечення раціональної організації роботи СЕЛ в регіонах, які можуть постраждати (або постраждали) внаслідок надзвичайної ситуації, за рахунок розробки моделей та методів розв'язання задач оптимального розташування нових підрозділів елементарного рівня (центрів першого етапу) і територіальної сегментації області для перерозподілу навантаження на всю структуру СЕЛ.

Постановка проблеми. Нехай потрібно розробити план евакуації населення з території, де склалася (або потенційно може статися) надзвичайна ситуація, до спеціально відведених центрів екстреної допомоги у відведений термін (або якомога менший час) і з якомога меншими транспортними витратами. При цьому слід врахувати, що частина населення володіє власними транспортними засобами і може дістатися пунктів кінцевого призначення самостійно. Цій категорії мешканців має бути лише вказано, на допомогу якого саме пункту вони можуть розраховувати. Решта населення евакуюється в два етапи: на першому – із зони небезпеки до первинного пункту збору (штабу, відповідального за евакуацію населення з певної зони, центру першого етапу), на другому – від штабів до вищезазначених центрів екстреної допомоги (центрів другого етапу) (рис. 1).

Розподіл постраждалого населення за центрами першого етапу має здійснюватися з урахуванням їх місткості. Якщо центри першого етапу не визначені заздалегідь, то їх потрібно розмістити і облаштувати з розрахунку на певну кількість мешканців, постраждалого від НС регіону. Відтак, потрібно закріпити за кожним з центрів зону, за евакуацію населення з якої він відповідає. Вважається, що кількість центрів другого порядку та їхні можливості дозволяють прийняти і надати допомогу усім постраждалим з території НС.

Отже, дану задачу можна сформулювати наступним чином: з метою здійснення евакуа-

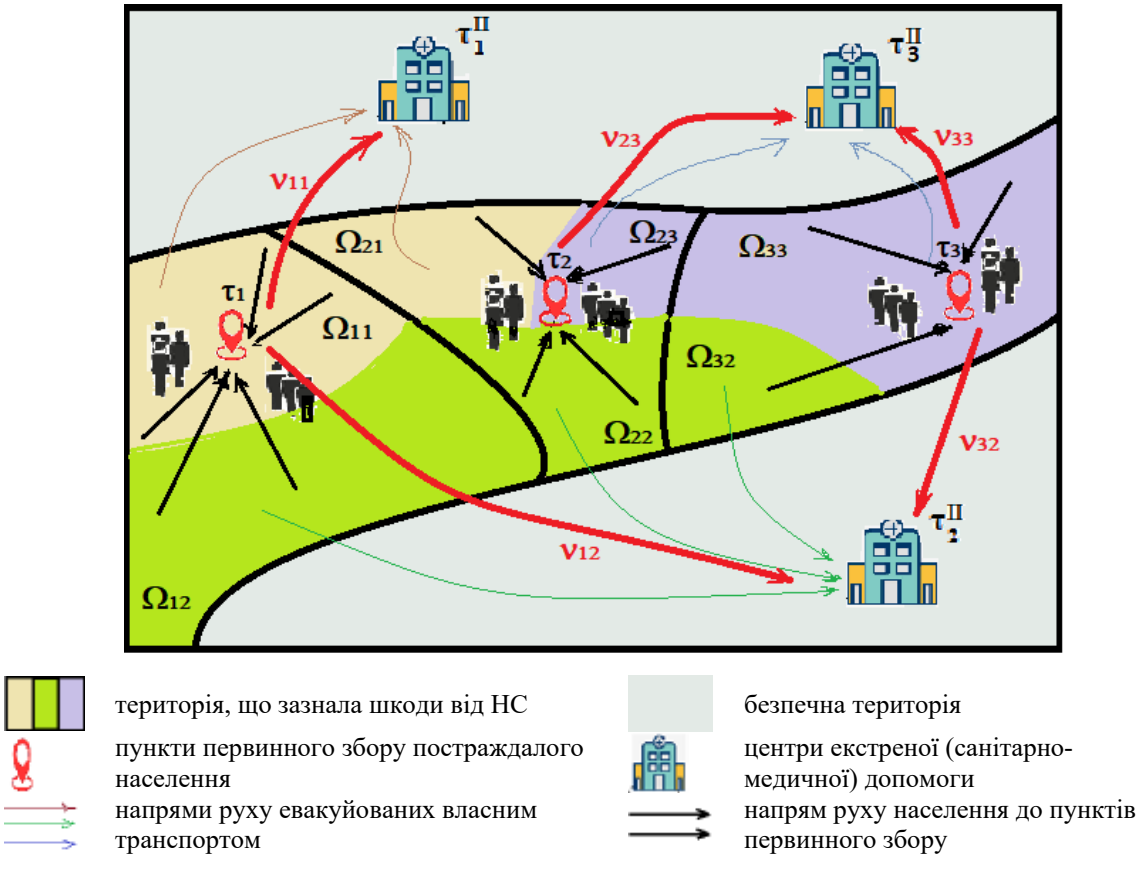


Рис. 1. Схема частково-двоетапної евакуації мешканців району Ω

ції населення з постраждалої від НС території у відведений (передбачений) термін і з якомога меншими транспортними і організаційними витратами визначити: 1) місця розміщення штабів (пунктів первинного збору); 2) їх зони відповідальності – постраждалі від НС території, евакуацію населення з яких центри організовують, розподіляючи частину мешканців одразу між кінцевими пунктами екстреної допомоги, а решту транспортуючи до останніх в два етапи; 3) кількість населення, на яку мають бути розраховані пункти первинного збору; 4) розподіл зібраних постраждалих для подальшого транспортування до кінцевих пунктів екстреної допомоги; 5) число транспортних засобів певної місткості, яке має бути задіяне для перевезення населення з центрів першого до центрів другого етапів у відведений термін; 6) план евакуації тієї частини населення, яка володіє власним транспортом і може дістатися кінцевого пункту самостійно.

Літературний огляд. Існує велика кількість робіт вчених і практиків, у яких піднімаються різні аспекти математичного моделювання і методів розв'язання оптимізаційних задач, що виникають під час розробки комплексу запобіжних заходів щодо організації процесів евакуації населення або надання йому первинної гуманітарної допомоги у разі надзвичайних ситуацій. Розробці наукових основ системи моніторингу надзвичайних ситуацій в Україні присвячені роботи (В.А. Андронов, М.М. Дівізінюк, В.Д. Калугін, & В.В. Тютюник, 2016), (В.Д. Калугін, В.В. Тютюник, Л.Ф. Чорногор, & Р.І. Шевченко, 2013). Широкий огляд підходів щодо математичного моделювання задач гуманітарної логістики наведено в Hezam, I.M., & Nayeem, Mk. (2021) та Alghanmi N. et al (2022). Питання розміщення аварійних служб і організації евакуаційних процесів розглянуто в Bayram, V., & Yaman, H. (2018). Проблемами розробки математичного забезпечення задач гуманітарної логістики займалися також L. Jin et al (2017), М.В. Новожилова, Р.В. Гудак, & О.І. Чуб (2020) та ін.

Значна частина моделей носить стохастичний характер (Moreno, Alem, Ferreira & Clark, 2018). Двоетапну стохастичну модель планування евакуації, яка передбачає оптимальне розташування місця укриття та призначення евакуйованих до найближчого укриття з мінімізацією очікуваного загального часу евакуації, розглянуто в Bayram and Yaman (2018).

Взагалі наукові дослідження щодо управління надзвичайними обставинами, класифікуються відповідно до стадії планування. На етапі підготовки до стихійного лиха або техногенної аварії основна увага приділяється плануванню дій в надзвичайних ситуаціях, у тому числі на укріплення будівель та інфраструктури (Kim, Li & Cho, 2020), завчасне розміщення центрів швидкого розподілення допомоги та евакуаційних сховищ. Існуючі моделі екстреної логістики у своїй більшості передбачають процес евакуації на основі фіксованих і заздалегідь визначених пунктів призначення. На етапі після катастрофи акцент зміщується на евакуацію населення до захисних споруд, розподіл допомоги (Wang, Du & Ma, 2014). Запропоновані при цьому математичні моделі є або лінійними, або задачами змішаного цілочисельного лінійного програмування, або подані динамічними мережевими потоками. Оптимізаційні критерії включають загальний час або відстань евакуації, час очікування евакуйованих або вартість транспортного потоку. В (Bretschneider & Kimms, 2011) розроблена модель евакуації, яка забезпечує реорганізацію маршрутизації трафіку у певній області при виникненні загрози і зводить до мінімуму час евакуації, запобігаючи конфлікти на перехрестях. Для реалізації цієї динамічної задачі мережевого потоку з додатковими цілочисельними змінними у кількості напрямків використовуваних полос руху і з відповідними складними обмеженнями автори пропонують використовувати евристичний підхід.

Під час типової евакуації деякі автомобілі потрібно евакуювати швидше за інші, наприклад, аварійні або великі, які транспортують набагато більше людей. Тому в Kamishetty and Paruchuri (2020) розроблено модель на основі рішення Парето, отриманого в Gupta and Paruchuri (2016), яка враховує пріоритетну маршрутизацію під час надзвичайних ситуацій з мінімальною вартістю та максимальною кількістю перевезеного населення.

Існує низка наукових робіт, де математичні моделі та методи розв'язання задач розміщення центрів первинної допомоги і планування евакуаційних процесів реалізовані з використанням сучасних ГІС, як, наприклад Miç, Koyuncu and Hallak (2019).

На відміну від більшості розглянутих задач, які зводяться до задач цілочисельного лінійного програмування, запропонована далі математична модель задачі частково-двоетапної евакуації населення на випадок НС має континуальний характер. В ній передбачається, що населення щільно розподілене в деякому регіоні, і останній розбивається на зони відповідальності певних підрозділів СЕЛ. Зонування території здійснюється за принципом територіальної близькості.

Запропонована математична модель та її різновиди є узагальненням неперервних задач оптимального розбиття множин з додатковими зв'язками (ОРМДЗ), поданих в S. Us, L. Koriashkina, & O. Stanina (2019) і застосованих для опису двоетапних процесів розподілу матеріальних потоків в транспортно-логістичних системах в B. Blyuss et al (2019, 09 July) та A. Bulat (2020). Розширення цього класу задач здійснюється врахуванням можливості прямої евакуації частини населення до пунктів кінцевого призначення, не збираючи його в проміжних пунктах.

Матеріали та методи. Для побудови математичної моделі задачі будемо використовувати такі позначення:

Ω − територія деякого регіону, що зазнала (може зазнати) пошкоджень в результаті надзвичайної ситуації, задана географічними координатами границь;

$\widehat{\Omega} \subseteq \Omega$ – територія, де можуть бути розміщені первинні пункти збору постраждалого населення (центри першого етапу);

$\rho(x)$ − функція, що описує щільність населення в точці x множини Ω, люд./м^2;

$\mu(x)$ – безрозмірна функція, яка приймає значення від 0 до 1 і задає частку населення, яка спроможна евакуюватися власним транспортом;

N − кількість пунктів первинного збору населення (центрів першого етапу);

M − кількість пунктів кінцевого призначення (центрів другого етапу);

K − кількість типів транспортних засобів, які можна використовувати для перевезення населення;

S − загальна кількість населення на заданій території Ω, люд.;

$Vehicle\_capacity_k, k = \overline{1,K}$ – максимально можлива місткість транспортного засобу k-го типу, люд.;

$Park_k, k = \overline{1,K}$ – максимальна кількість транспортних засобів k-го типу, яку можна використовувати для евакуації населення;

$Evacuation\_period$ – максимальний термін евакуації мешканців з території НС до пунктів первинного збору;

$v_{min} > 0$ – мінімально допустима швидкість евакуації;

$\tau_i^r = \left(\tau_i^{(1)r}, \tau_i^{(2)r}\right)$ − координати i-го центру r-го етапу;

b_i^r − місткість i-го центру r-го етапу, $r = I, II$, люд.;

$c_i^I\left(x, \tau_i^I\right)$ − вартість евакуації мешканця від точки $x \in \Omega$ до i-го центру I-го етапу, яку можна вважати пропорційною відстані між точками, грн./люд.;

$c_{ij}^{II}\left(x, \tau_j^{II}\right)$ – кошти, які можуть бути виділені центром τ_i^I постраждалим в точці $x \in \Omega_i$ для їх самостійного переїзду до центру τ_j^{II} II-го етапу; розмір допомоги може бути фіксованим, а може враховувати відстань між початковим і кінцевим пунктами, грн./люд.;

$c_{ijk}^{II}\left(\tau_i^I, \tau_j^{II}\right)$ – вартість перевезення населення від центру τ_i^I до центру τ_j^{II}, k-м типом транспортного засобу, грн./один. трансп.;

a_i^I − вартість облаштування первинного пункту збору населення в точці τ_i^I, розрахована на одну евакуйовану людину, грн/люд.;

Ω_i – зона відповідальності центру τ_i^I;

Ω_{ij} – територія, закріплена за центром τ_i^I, з якої мешканці самостійно евакуюються до центру τ_j^{II}, так що $\bigcup_{j=1}^{M} \Omega_{ij} = \Omega_i, mes\left(\Omega_{is} \cap \Omega_{ij}\right) = 0,\ s \neq j, s, j = \overline{1,M}$;

$\nu_{ij},\ i = \overline{1,N};\ j = \overline{1,M}$ − число евакуйованих, які транспортуються від центру τ_i^I до спеціалізованого структурного підрозділу системи екстреної допомоги τ_j^{II} (центри другого етапу), люд.;

V_Num_{ijk} − число транспортних засобів k-го типу, яке потрібно залучити для перевезення евакуйованих від центру τ_i^I до спеціалізованого структурного підрозділу СЕЛ τ_j^{II} (центри другого етапу), люд., $i = \overline{1,N};\ j = \overline{1,M},\ k = \overline{1,K}$.

Відтак, маємо справу з дворівневим розбиттям (розбиттям в розбитті): кожна із зон Ω_i, $i = 1,2,\ldots,N$, що складають розбиття Ω, розбивається у свою чергу на зони $\Omega_{i1}, \Omega_{i2}, \ldots, \Omega_{iM}$, з яких, за розпорядженням штабу в пункті τ_i^I, мешканці власним транспортом евакуюються до відповідних центрів $\tau_1^{II}, \tau_2^{II}, \ldots, \tau_M^{II}$.

Нехай Σ_Ω^N – клас всіх можливих розбиттів $\underline{\omega} = \{\Omega_1, \Omega_2, \ldots, \Omega_N\}$ множини Ω на N підмножин (як в усіх задачах вище), а для кожного $i = 1,2,\ldots,N$ клас $\Sigma_{\Omega_i}^M$ – клас всіх можливих розбиттів множини Ω_i на M підмножин:

$$\Sigma_{\Omega_i}^M = \left\{ \underline{\varsigma}_i = \{\Omega_{i1}, \Omega_{i2}, \ldots, \Omega_{iM}\} : \bigcup_{j=1}^{M} \Omega_{ij} = \Omega_i, mes\left(\Omega_{is} \cap \Omega_{ij}\right) = 0,\ s \neq j, s, j = \overline{1,M} \right\}.$$

Тоді можна ввести до розгляду взагалі клас всіх можливих розбиттів Ω на NM підмножин

$$\Sigma_\Omega^{NM} = \left\{ \underline{\varsigma} = \left\{ \underline{\varsigma}_1, \underline{\varsigma}_2, \ldots, \underline{\varsigma}_N \right\} : \underline{\varsigma}_i \in \Sigma_{\Omega_i}^M,\ i = \overline{1,N}, \bigcup_{i=1}^{N} \Omega_i = \Omega, mes\left(\Omega_i \cap \Omega_q\right) = 0,\ i \neq q, i, q = \overline{1,N} \right\}.$$

Задача: потрібно знайти таке розбиття $\bar{\varsigma} = \left\{ \bar{\varsigma}_1, \bar{\varsigma}_2, \ldots, \bar{\varsigma}_N \right\}$ множини Ω на NM підмножин і визначити такі $\tau^I = \left(\tau_1^I, \ldots, \tau_N^I \right)$, $\nu = \left\{ \nu_{11}, \ldots, \nu_{ij}, \ldots, \nu_{NM} \right\}$ та $V\_Num = \{ V\_Num_{ijk} \}$, $i = \overline{1,N}, i = \overline{1,N}$, $k = \overline{1,K}$, за яких

$$F\left(\bar{\varsigma}, \tau^I, \nu, V\_Num \right) \to min, \quad (1)$$

$$F\left(\bar{\varsigma}, \tau^I, \nu, V\_Num \right) =$$

$$= \beta_1 \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} \int_{\Omega_{ij}} \left(c_i^I \left(x, \tau_i \right) + a_i^I \right) \left(1 - \mu(x) \right) \rho(x) dx +$$

$$+ \beta_2 \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} \sum_{k=1}^{K} c_{ijk}^{II} \left(\tau_i^I, \tau_j^{II} \right) \cdot V\_Num_{ijk} +$$

$$+ \beta_3 \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} \int_{\Omega_{ij}} c_{ij}^{II} \left(x, \tau_j^{II} \right) \mu(x) \rho(x) dx;$$

за умов

$$\int_{\Omega_i} \left(1 - \mu(x) \right) \rho(x) dx = \sum_{j=1}^{M} \nu_{ij}, \quad i = \overline{1,N}, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{N} \int_{\Omega_{ij}} \mu(x) \rho(x) dx + \nu_{ij} = b_j^{II}, \quad j = \overline{1,M}, \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^{K} Vehicle\_capacity_k \cdot V\_Num_{ijk} \geq \nu_{ij}, i = \overline{1,N}, j = \overline{1,M}, \quad (4)$$

$$\frac{1}{v\_min} \sup_{x \in \Omega} \min_{i=1,\ldots,N} d\left(x, \tau_i^I \right) \leq Evacuation\_period, \quad (5)$$

$$0 \leq \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} V\_Num_{ijk} \leq Park_k, k = \overline{1,K}, \quad (6)$$

$$\bar{\varsigma} \in \Sigma_{\Omega}^{NM}, \quad \nu \in R_{NM}^{+}, V\_Num \in Z_{NMK}^{+}, \quad \tau^I \in \widehat{\Omega}^N, \quad (7)$$

де $\beta_1, \beta_2, \beta_3 \geq 0, \beta_1^2 + \beta_2^2 + \beta_3^2 \neq 0$ – задані коефіцієнти, які визначають пріоритет доданків і враховують їх нормування і безрозмірність; $d\left(x, \tau_i^I \right)$ – відстань між точками x та τ_i^I; Σ_{Ω}^{NM} – клас всіх можливих розбиттів множини Ω на NM підмножин; $\bar{\varsigma}$ – елемент класу Σ_{Ω}^{NM}; R_{NM}^{+} – NM-вимірний простір невід'ємних дійсних чисел; Z_{NMK}^{+} – NMK-вимірний простір невід'ємних цілих чисел.

В задачі (1) – (7):

– перший доданок функціоналу враховує витрати на організацію штабів і первинних пунктів збору, а також транспортні витрати на перевезення до них населення з постраждалого регіону;

– другий доданок функціоналу пов'язаний з витратами оренди транспортних засобів і перевезення ними населення від центрів першого до центрів другого;

– третій доданок критерію якості описує витрати на дотації населенню, яке самостійно евакуюється;

– умова (2) означає, що всі мешканці, зібрані в центрах першого етапу, перерозподіляються між центрами другого етапу і мають бути до них перевезені;

– умова (3) враховує місткість центрів другого етапу і передбачає, що вона дорівнює загальній кількості мешканців постраждалого регіону, котрі дісталися відповідних центрів і самостійно, і організовано;

– умова (4) накладається на кількість задіяних транспортних засобів різних типів, які мають бути задіяні до евакуаційного процесу, аби вивести всіх постраждалих з центрів першого етапу;

– обмеження (5) враховує максимально допустимий час, за який усі мешканці постраждалого регіону мають дістатися до пунктів первинного збору;

– умова (6) пов'язана із обмеженим парком наявних транспортних засобів;

– (7) – умови допустимості шуканих величин.

Залежно від початкових даних можна сформулювати різні варіанти задачі (1) – (7), наприклад: з фіксованими центрами першого етапу, з обмеженнями на їх потужності і без таких умов, без врахування типів транспортних засобів, що використовуються для евакуації, вважаючи, що наявна достатня їх кількість та інші. Можна, навіть припустити, що пункти первинного збору населення взагалі непотрібні. Тоді модель буде зведено до звичайної неперервної задачі оптимального розбиття множин [18].

Задача (1) – (7) є новою за своєю математичною постановкою, в класі неперервних задач оптимального розбиття множин з додатковими зв'язками, оскільки передбачає необов'язкове використання проміжних центрів в багатоетапній транспортно-логістичній мережі. За рахунок введення до розгляду параметрів і змінних, які пов'язані з використовуваними транспортними засобами, задача (1) – (7) носить дискретно-неперервний характер, а, отже, потребує залучення методів не лише теорії оптимального розбиття множин, а й комбінаторної оптимізації.

Зазначені властивості моделі обумовлюють її складність, потребу в теоретичному дослідженні і обґрунтуванні умов існування допустимих і оптимальних розв'язків, розробку методів і алгоритмів розв'язання таких задач, що є напрямком подальших наукових досліджень.

Висновки. Запропоновано нові моделі оптимізації систем екстреної логістики з мішаними евакуаційними процесами, які враховують те, що частина мешканців постраждалого регіону може самостійно дістатися центрів другого етапу, а решта евакуюється через проміжні пункти. Розроблені моделі є більш гнучкими щодо опису систем екстреної логістики у порівнянні із звичайними неперервними задачами ОРМДЗ і розширюють клас останніх. Математичні постановки та методи розв'язання задач оптимізації систем екстреної логістики дозволяють особам, які здійснюють реагування, та політикам визначати необхідний час для евакуації та оцінювати кількість і розподіл можливих жертв за різних сценаріїв НС.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Alghanmi, N., Alotaibi, R., Alshammari, S., Alhothali, A., Bamasag, O., & Faisal, K. A Survey of Location-Allocation of Points of Dispensing During Public Health Emergencies. *Front. Public Health* 10:811858. 2022. DOI: 10.3389/fpubh.2022.811858

2. Bayram, V., & Yaman, H. Shelter location and evacuation route assignment under uncertainty: a benders decomposition approach. *Transportation Science*, *volume.* 2018. 52(2), 416-436. URL: https://doi.org/10.1287/trsc.2017.0762

3. Blyuss, B., Koriashkina, L., Us, S., Minieiev, S., & Dziuba, S. An optimal two-stage distribution of material flow at the fuel and energy complex enterprises. E3S Web of Conferences 109, 00008. 2019, 09 July. URL: https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900008

4. Bretschneider, S., & Kimms, A. A basic mathematical model for evacuation problems in urban areas. *Transportation Research Part A: Policy and Practice, Elsevier, 2011. vol. 45(6),* 523-539. URL: https://doi.org/10.1016/j.tra.2011.03.008

5. Bulat, A., Dziuba, S., Minieiev, S., Koriashkina, L., & Us, S. Solution of the problem to optimize two-stage allocation of the material flows. *Mining of Mineral Deposits, 2020. volume 14(1),* 27-35. URL: https://doi.org/10.33271/mining14.01.027

6. Gupta, G., & Paruchuri, P. Effect of human behavior on traffic patterns during an emergency. *In 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2016. 2052- 2058. URL: https://doi.org/ 10.1109/ITSC.2016.7795888

7. Hezam, I.M., & Nayeem, Mk. A Systematic Literature Review on Mathematical Models of Humanitarian Logistics. Symmetry, 2021. volume 13(1):11. URL: https://doi.org/10.3390/sym13010011.

8. Jin, L., Xiang, M., Chen, S., Zheng, X., Yao, R., & Chen, Y. An Orderly Untangling Model against Arching Effect in Emergency Evacuation Based on Equilibrium Partition of Crowd. *Discrete Dynamics in Nature and Society, volume 2017*, Article ID 2757939, 7 pages. URL: https://doi.org/10.1155/2017/2757939

9. Kamishetty, S., & Paruchuri, P. Towards a Better Management of Emergency Evacuation using Pareto Min Cost Max Flow Approach. *In Proceedings of the 6th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems (VEHITS 2020)*, 2020. 237-244. URL: https://doi.org/10.5220/0009395302370244

10. Kim, S.H., Li, K.J. & Cho, H.G. A Flexible Framework for Covering and Partitioning Problems in Indoor Spaces. *ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2020, 9*, 618. URL: https://doi.org/10.3390/ijgi9110618

11. Miç, P., Koyuncu, M., & Hallak, J. Primary Health Care Center (PHCC) Location-Allocation with Multi-Objective Modelling: A Case Study in Idleb, Syria. *International journal of environmental research and public health*, *2019. 16*(5), 811. https://doi.org/10.3390/ijerph16050811

12. Moreno, A., Alem, D., Ferreira, D., & Clark, A. An effective two-stage stochastic multi-trip location-transportation model with social concerns in relief supply chains. *Eur. J. Oper. Res., 269*, 1050-1071. 2018. URL: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.02.022

13. Us, S., Koriashkina, L., & Stanina, O. An optimal two-stage allocation of material flows in a transport-logistic system with continuously distributed resource. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, *2019,* (1). URL: https://doi.org/10.15588/1607-3274-2019-1-24

14. Wang, H., Du, L., & Ma, S. Multi-objective open location-routing model with split delivery for optimized relief distribution in post-earthquake. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev., 2014. volume 69*, 160-179. URL: https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.06.006

15. Калугін В.Д. Розробка науково-технічних основ для створення системи моніторингу, попередження та ліквідації надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру та забезпечення екологічної безпеки / В.Д. Калугін, В.В. Тютюник, Л.Ф. Чорногор, Р.І. Шевченко // Системи обробки інформації. Харків: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2013. Вип. 9(116). С. 204 – 216.

16. Науково-конструкторські основи створення комплексної системи моніторингу надзвичайних ситуацій в Україні: Монографія / В.А. Андронов, М.М. Дівізінюк, В.Д. Калугін, В.В. Тютюник. Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2016. 319 с.

17. Новожилова М.В. Оцінка ефективності засобів ліквідації надзвичайної ситуації природного характеру методами нечіткої логіки / М.В. Новожилова, Р.В. Гудак, О.І. Чуб // Комунальне господарство міст, 2020, том 1, вип. 154. С. 126 – 132. DOI: 10.33042/2522-1809-2020-1-154-126-132

18. Kiseleva, E.M., & Koriashkina, L.S. Theory of continuous optimal set partitioning problems as a universal mathematical formalism for constructing Voronoi diagrams and their generalizations. II. Algorithms for constructing Voronoi diagrams based on the theory of optimal set partitioning. Cybernetics and Systems Analysis, 2015. 51(4), 489-499. URL: https://doi.org/10.1007/s10559-015-9740-y

REFERENCES:

1. Alghanmi, N., Alotaibi, R., Alshammari, S., Alhothali, A., Bamasag, O., & Faisal, K. (2022). A Survey of Location-Allocation of Points of Dispensing During Public Health Emergencies. *Front. Public Health* 10:811858. DOI: 10.3389/fpubh.2022.811858

2. Bayram, V., & Yaman, H. (2018). Shelter location and evacuation route assignment under uncertainty: a benders decomposition approach. *Transportation Science*, *volume 52*(2), 416-436. Retrieved from https://doi.org/10.1287/trsc.2017.0762

3. Blyuss, B., Koriashkina, L., Us, S., Minieiev, S., & Dziuba, S. (2019, 09 July). An optimal two-stage distribution of material flow at the fuel and energy complex enterprises. E3S Web of Conferences 109, 00008. Retrieved from https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900008

4. Bretschneider, S., & Kimms, A. (2011). A basic mathematical model for evacuation problems in urban areas. *Transportation Research Part A: Policy and Practice, Elsevier, vol. 45*(6), 523-539. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.tra.2011.03.008

5. Bulat, A., Dziuba, S., Minieiev, S., Koriashkina, L., & Us, S. (2020). Solution of the problem to optimize two-stage allocation of the material flows. *Mining of Mineral Deposits, volume 14*(1), 27-35. Retrieved from https://doi.org/10.33271/mining14.01.027

6. Gupta, G., & Paruchuri, P. (2016). Effect of human behavior on traffic patterns during an emergency. *In 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2052- 2058. Retrieved from https://doi.org/ 10.1109/ITSC.2016.7795888

7. Hezam, I.M., & Nayeem, Mk. (2021). A Systematic Literature Review on Mathematical Models of Humanitarian Logistics. Symmetry, volume 13(1):11. Retrieved from https://doi.org/10.3390/sym13010011.

8. Jin, L., Xiang, M., Chen, S., Zheng, X., Yao, R., & Chen, Y. (2017). An Orderly Untangling Model against Arching Effect in Emergency Evacuation Based on Equilibrium Partition of Crowd. *Discrete Dynamics in Nature and Society, volume 2017*, Article ID 2757939, 7 pages. Retrieved from https://doi.org/10.1155/2017/2757939

9. Kamishetty, S., & Paruchuri, P. (2020). Towards a Better Management of Emergency Evacuation using Pareto Min Cost Max Flow Approach. *In Proceedings of the 6th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems (VEHITS 2020)*, 237-244. Retrieved from https://doi.org/10.5220/0009395302370244

10. Kim, S.H., Li, K.J. & Cho, H.G. (2020). A Flexible Framework for Covering and Partitioning Problems in Indoor Spaces. *ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2020, 9*, 618. Retrieved from https://doi.org/10.3390/ijgi9110618

11. Miç, P., Koyuncu, M., & Hallak, J. (2019). Primary Health Care Center (PHCC) Location-Allocation with Multi-Objective Modelling: A Case Study in Idleb, Syria. *International journal of environmental research and public health*, *16*(5), 811. Retrieved from https://doi.org/10.3390/ijerph16050811

12. Moreno, A., Alem, D., Ferreira, D., & Clark, A. (2018). An effective two-stage stochastic multi-trip location-transportation model with social concerns in relief supply chains. *Eur. J. Oper. Res., 269*, 1050-1071. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.02.022

13. Us, S., Koriashkina, L., & Stanina, O. (2019). An optimal two-stage allocation of material flows in a transport-logistic system with continuously distributed resource. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, (1). Retrieved from https://doi.org/10.15588/1607-3274-2019-1-24

14. Wang, H., Du, L., & Ma, S. (2014). Multi-objective open location-routing model with split delivery for optimized relief distribution in post-earthquake. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev., volume 69*, 160-179. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.06.006

15. Kaluhin, V.D. (2013). Rozrobka naukovo-tekhnichnykh osnov dlia stvorennia systemy monitorynhu, poperedzhennia ta likvidatsii nadzvychainykh sytuatsii pryrodnoho ta tekhnohennoho kharakteru ta zabezpechennia ekolohichnoi bezpeky / V.D. Kaluhin, V.V. Tiutiunyk, L.F. Chornohor, R.I. Shevchenko // Systemy

obrobky informatsii. Kharkiv: Kharkivskyi universytet Povitrianykh Syl imeni Ivana Kozheduba. Vyp. 9(116). S. 204 – 216. [in Ukrainian].

16. Naukovo-konstruktorski osnovy stvorennia kompleksnoi systemy monitorynhu nadzvychainykh sytuatsii v Ukraini: Monohrafiia / V.A. Andronov, M.M. Diviziniuk, V.D. Kaluhin, V.V. Tiutiunyk. (2016). Kharkiv: Natsionalnyi universytet tsyvilnoho zakhystu Ukrainy. 319 s. [in Ukrainian].

17. Novozhylova, M.V. (2020). Otsinka efektyvnosti zasobiv likvidatsii nadzvychainoi sytuatsii pryrodnoho kharakteru metodamy nechitkoi lohiky / M.V. Novozhylova, R.V. Hudak, O.I. Chub // Komunalne hospodarstvo mist, tom 1, vypusk 154. S. 126 – 132. DOI: 10.33042/2522-1809-2020-1-154-126-132 [in Ukrainian].

18. Kiseleva, E.M., & Koriashkina, L.S. (2015). Theory of continuous optimal set partitioning problems as a universal mathematical formalism for constructing Voronoi diagrams and their generalizations. II. Algorithms for constructing Voronoi diagrams based on the theory of optimal set partitioning. Cybernetics and Systems Analysis, 51(4), 489-499. Retrieved from https://doi.org/10.1007/s10559-015-9740-y

УДК 004.75:004.52
DOI https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-3

Антоніна КАШТАЛЬЯН
к.т.н., докторанка, доцент, Хмельницький національний університет, вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький, Україна, 29016, yantonina@ukr.net
***ORCID:** 0000-0002-4925-9713*
***Scopus Author ID:** 57218242499*

Бібліографічний опис статті: Каштальян, А. (2023). Концептуальна модель архітектури мультикомп'ютерних систем із приманками та пастками для виявлення та протидії зловмисному програмному забезпеченню та комп'ютерним атакам. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security,* 3, 22–31, doi: https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-3

КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ АРХІТЕКТУРИ МУЛЬТИКОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ ІЗ ПРИМАНКАМИ ТА ПАСТКАМИ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ТА ПРОТИДІЇ ЗЛОВМИСНОМУ ПРОГРАМНОМУ ЗАБЕЗПЕЧЕННЮ ТА КОМП'ЮТЕРНИМ АТАКАМ

В роботі здійснено аналіз такого класу систем виявлення та протидії зловмисному програмному забезпеченню та комп'ютерним атакам як обманні системи. В таких системах закладаються функціонали з приманок і пасток. І такі системи використовують додатково та сумісно з рештою систем іншого спрямування для виявлення та протидії зловмисному програмному забезпеченню та комп'ютерним атакам. При експлуатації корпоративних мереж використовуються різноманітні системи виявлення та протидії зловмисному програмному забезпеченню та комп'ютерним атакам. Основним завданням для адміністраторів корпоративних мереж є те, щоб застосовувані ними засоби та їх особливості не були відомі зловмисникам.

В роботі запропоновано концептуальну модель архітектури мультикомп'ютерних систем з приманками та пастками для виявлення та протидії зловмисному програмному забезпеченню та комп'ютерним атакам. Особливістю запропонованої моделі є те, що в ній синтезовано характерні властивості такого класу систем та особливу характеристичну властивість. Цією характеристичною властивістю є контролер системи за прийнятими в ній рішеннями. Це необхідно для того, щоб системи такого класу були невідомими для зловмисників. Це дасть змогу забезпечити ефективну протидію зловмисникам, які здійснюють спроби проникнення в корпоративні мережі, використовуючи різноманітні способи та засоби.

В роботі запропонована методика розрахунку ефективності мультикомп'ютерних систем такого класу. Також, було здійснено постановку експерименту для розробленої системи згідно запропонованої концептуальної моделі. Результати проведеного експерименту підтверджують перспективність досліджень в напрямі використання контролера в мультикомп'ютерних системах приманок та пасток для виявлення та протидії ЗПЗ та КА.

Напрямом подальших досліджень буде деталізація запропонованої концептуальної моделі архітектури мультикомп'ютерних систем до рівня типових елементів та компонентів і, відповідно, доповнення її відображенням зв'язків між ними.

***Ключові слова:** обманні системи; мультикомп'ютерні системи; контролер; зловмисне програмне забезпечення; комп'ютерні атаки.*

Antonina KASHTALIAN
PhD, Associate Professor of the Department of Physics and Electrical Engineering, Doctoral Staff, Khmelnytskyi National University, 11, Instytutska str., Khmelnytskyi, Ukraine, 29016, yantonina@ukr.net
***ORCID:** 0000-0002-4925-9713*
***Scopus Author ID:** 57218242499*

To cite this article: Kashtalian, A. (2023). Kontseptualna model arkhitektury multykompiuternykh system iz prymankamy ta pastkamy dlia vyiavlennia ta protydii zlovmysnomu prohramnomu zabezpechenniu ta kompiuternym atakam [A conceptual model of the architecture of multi-computer systems with decoys and traps for detecting and countering malware and computer attacks]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 3, 22–31, doi: https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-3

A CONCEPTUAL MODEL OF THE ARCHITECTURE OF MULTI-COMPUTER SYSTEMS WITH DECOYS AND TRAPS FOR DETECTING AND COUNTERING MALWARE AND COMPUTER ATTACKS

The work analyzes such a class of systems for detecting and countering malicious software and computer attacks as deception systems. In such systems, functional systems of baits and traps are laid. And such systems are used in addition and compatible with the rest of the systems of the other direction to detect and counter malicious software and computer attacks. When operating corporate networks, various systems for detecting and countering malicious software and computer attacks are used. The main task for administrators of corporate networks is to ensure that the tools they use and their features are not known to attackers.

The paper proposes a conceptual model of the architecture of multicomputer systems with decoys and traps for detecting and countering malicious software and computer attacks. The peculiarity of the proposed model is that it synthesizes the characteristic properties of this class of systems and a special characteristic property. This characteristic property is the controller of the system according to the decisions made in it. This is necessary so that systems of this class are unknown to attackers. This will make it possible to provide effective countermeasures against attackers who attempt to penetrate corporate networks using various methods and means.

The paper proposes a method for calculating the efficiency of multicomputer systems of this class. Also, an experiment was set up for the developed system according to the proposed conceptual model. The results of the conducted experiment confirm the perspective of research in the direction of using the controller in multi-computer systems of baits and traps for the detection and countermeasures of malware and computer attacks.

The direction of further research will be detailing the proposed conceptual model of the architecture of multicomputer systems to the level of typical elements and components and, accordingly, supplementing it with a display of the connections between them.

Key words: *deceptive systems; multicomputer systems; controller; malicious software; computer attacks.*

Вступ. При експлуатації корпоративних мереж використовуються різноманітні системи виявлення та протидії зловмисному програмному забезпеченню (ЗПЗ) та комп'ютерним атакам (КА). Архітектура таких систем та їх особливості повинні бути невідомими для зловмисників. Це дасть змогу забезпечити ефективну протидію зловмисникам, які здійснюють спроби проникнення в корпоративні мережі, використовуючи різноманітні способи та засоби. Перспективним напрямом дослідження стає розробка нової архітектури систем, які б використовувались на різних етапах виявлення та протидії ЗПЗ та КА. Ці системи могли б стати основою синтезу систем з приманками та пастками для виявлення та протидії ЗПЗ і КА, що демонструють свою ефективність і, відповідно, зацікавленість в користувачів. Це підтверджується, також тим, що спостерігається стрімкий розвиток таких систем на ринку спеціалізованого антивірусного програмного забезпечення для використання в корпоративних мережах. Розміщення таких систем в корпоративних мережах повинно залучати більшість з комп'ютерних станцій, які активно використовуються та функціонують в комп'ютерній мережі. Тому, поєднання комп'ютерних станцій з використанням проміжного програмного забезпечення дасть змогу створити спеціалізовану мультикомп'ютерну систему. Важливою особливістю в архітектурі таких систем є реалізація спроможності, побудованої згідно неї системи, приймати рішення, відповідно до поточного стану в цілому, зокрема, для уникнення вивчення поведінки системи зловмисниками при повторенні їх дій спроможності системи при однакових початкових станах вибирати різні наступні кроки. Така вимога потребує синтезу в архітектурі системи окремого контролера за результатами прийнятих рішень відповідною підсистемою.

Для вирішення проблеми розробки архітектури таких систем здійснимо розроблення концептуальної моделі архітектури мультикомп'ютерних систем з приманками та пастками для виявлення та протидії ЗПЗ і КА. Такі системи відносяться до класу систем обману, в яких наявні приманки та пастки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Системи, побудовані на основі обманних технологій, містять різного типу приманки та пастки, які імітують роботу реальних систем (Zobal L.D., 2019, p. 1-9). Обманні системи розглядаються як підробні системи, інтегровані в комп'ютерні системи (Almeshekah M.H., 2016), які використовують для спотворення стану мережі для введення в оману зловмисників (Fraunhol D., 2018), відслідковування та взаємодії з ними, збору даних про атаки, дії та характеристики зловмисників (Zielinski D., 2022). При розробці обманних систем до них висуваються вимоги одночасно бути привабливими для зловмисників та мінімізувати супутні витрати на їх функціонування. В зв'язку з цим суттєва увага приділяється розробці конфігурації такої системи та розташуванню приманок. В роботі (Acosta J.C., 2021, p. 1-18) запропонований підхід для вибір-

кового встановлення приманки, який дозволяє динамічно використовувати ресурси відповідно до дій зловмисника. Приманки такої системи складаються з простору імен ядра та віртуальних машин, що активуються. Ряд робіт присвячено локалізації приманок в мережі. В роботі (Anwar A.H., 2022, p. 3438-3452) розглянуто двофазний метод обману, в першій фазі якого розробляється проактивна політика локалізації приманки, в другій фазі реалізується реактивний підхід, що динамічно визначає розташування приманок. Наявність приманок та самої deception системи має бути прихована від зловмисників, з метою чого використовують методи запобігання виявленню, що ґрунтуються на досліджених стратегіях виявлення приманок (Tsikerdekis M., 2018, p. 1-6) та динамічних приманках (Mphago B., 2017, p. 179-185).

Методи згідно обманних технологій комбінують застосування штучного інтелекту, теорії ігор та навчання з підкріпленням. Стратегія розташування приманок, також, враховує вподобання зловмисників (Sayed M.A., 2023), модель динамічної гри для двох гравців явно враховує розвиток станів в результаті змін у підключенні до мережі. Теоретико-ігровий підхід, також, пропонується використовувати для захисту найбільш цінних ресурсів мережі (Anwar A.H., 2022, p. 543-549), оцінки впливу розміру мережі на рішення зловмисників щодо атак (Katakwar H., 2020) та захисту ресурсів мережі від DoS атак (Çeker H., 2016), що дозволяє моделювати взаємодію між засобами захисту та зловмисниками згідно моделі гри та визначати оптимальну конфігурацію для запобігання атакам. В роботі (Huang L., 2021, p. 4843-4856) запропоновано теоретико-ігровий метод для проєктування обманних механізмів, що складаються з генератора, стимулюючого модулятора та модулятора довіри, які дозволяють спонукати зловмисників до бажаних дій. На основі гіпергри запропоновано метод розгортання системи приманок, що збалансовано використовує приманки високого на низького рівня взаємодії (Anwar A.H., 2023, p. 3393-3398).

Обманні системи широко використовуються для захисту різного типу систем, в тому числі IoT (Razali M.F., 2018), промислової автоматизації, цифрових двійників (Priya V.S.D., 2023), вбудованих пристроїв та мереж, під'єднаних до мережі Інтернет (Sikos L.F., 2023, Feng M., 2022). Мережі автоматизованих систем управління потребують використання спеціальних протоколів та специфічних методів захисту від кіберзагроз. Для цього адаптується обманна технологія приманок (Abe S., 2018, p. 372-379). Використання обманних систем приманок є важливим у сфері баз даних для захисту критичних даних організацій (Wegerer, 2016, p. 6-10).

Сучасні системи, побудовані згідно обманних технологій, мають ряд переваг порівняно з іншими. Зокрема, це масштабованість, гнучкість, керованість та інтегрованість систем. Такі системи здатні автоматизувати, конфігурувати та розгортати приманки та пастки, використовувати штучний інтелект для оптимізації обманного середовища (Acalvio ShadowPlex), підтримувати значну кількість обманних об'єктів, є гнучкими до налаштувань та інтеграції з існуючими системами захисту та менеджменту (CounterCraft Cyber Deception Platform). Системи можуть бути розгорнуті локально, в хмарному середовищі, в центрах даних, гібридних середовищах, тощо (Attivo ThreatDefend Deception and Response Platform), визначають будь-які зміни в середовищі та активують обманні можливості для захисту від атак поштових сервісів, мобільного зв'язку, соціальних мереж та стаціонарних робочих станцій (Proofpoint Identity Threat Defense). Такі системи мають високу точність виявлення зловмисних дій із відсутністю хибно позитивних спрацювань (Fidelis Deception platform).

Таким чином, проведений аналіз останніх досліджень та реальних розробок обманних систем підтверджує перспективність такого напряму для вирішення проблеми виявлення та протидії ЗПЗ та КА. Зростання кількості досліджень в цьому суттєво ускладнюватиме зловмисникам їх спроби у здійснення атак на комп'ютерні системи користувачів через різноманітність таких засобів.

Методологія дослідження. Користувачам комп'ютерних мереж необхідні системи для виявлення ЗПЗ та КА, які дадуть змогу, крім забезпечення безпеки на різних етапах можливого проникнення в комп'ютерні системи чи станції, що об'єднані в мережу, для етапу, коли на всіх попередніх етапах такі виявлення не були здійснені, але могли мати місце проникнення в систему. Тобто, розглядатимемо ті системи, які використовуватимуться для виявлення ЗПЗ та КА, які змогли пройти всі етапи захисту комп'ютерних станцій та мережі, і їх відсоток може бути невеликим. Крім того, такі системи повинні залучатись і до попередження та виявлення ЗПЗ та КА на всіх етапах їх спроб проникнення та інфікування об'єктів КС, як додаткові системи. Розробники різних засобів попередження, виявлення та протидії ЗПЗ та КА заявляють про великий відсоток правильного достовірного виявлення, але неве-

ликий відсоток для невиявлених ЗПЗ та КА при стрімкому щорічному зростанні кількості таких засобів може бути великим кількісно. Це може призвести до їх проникнення в КС, що створить проблеми користувачам і, дійсно, може бути представлений певною кількістю таких засобів, для виявлення яких необхідні системи виявлення та протидії, що матимуть нестандартні конфігурування і спроможності до автоматичної зміни своєї архітектури та прийнятих рішень без втручання користувача. Потреба в таких системах зростає і через необхідність та бажання здійснення зі сторони власників комп'ютерних мереж, які, наприклад, експлуатуються на підприємствах, прихованого спостереження за процесами в мережі та виявлення тих з них, які можуть створити загрози даним, що зберігаються у відповідних ресурсах в мережі.

Серед різних за призначенням систем виявлення ЗПЗ та КА є системи, які крім виявлення загроз створюють в комп'ютерних мережах хибні об'єкти для атак, що надає змогу адміністраторам таких мереж можливість відслідковувати процеси в мережах, які є зловмисними чи аномальними і потребують зупинки. Тому, перспективними для розробки є системи, які орієнтовані на виявлення ЗПЗ та КА, що пройшли певні етапи захисту, на яких використовувались традиційні засоби і системи попередження, виявлення та протидії, призначення яких та можливі варіанти конфігурування при використанні відомі зловмисникам. Серед таких систем особливе місце в класифікації займають системи попередження, виявлення та протидії із певною множиною приманок та пасток для ЗПЗ та КА. Їх використання створює хибні об'єкти атаки для зловмисника та дозволяє зберегти відомості про такі атаки та розповсюдження ЗПЗ в комп'ютерних станціях в мережі.

Для покращення ефективності систем виявлення та протидії ЗПЗ та КА за рахунок використання приманок та пасток, необхідним є інтегрування цих засобів в складні системи із залученням всіх комп'ютерних станцій в мережі та організації функціонування їх таким чином, щоб вони могли реагувати на зловмисні та аномальні процеси сумісно та без втручання користувача. Таким чином, необхідним є побудова не однієї приманки та пастки в певній комп'ютерній станції, а мережі приманок та пасток для здійснення комплексного захисту комп'ютерної мережі на етапі, коли КА змогли пройти через міжмережне екранування, а ЗПЗ змогло подолати перевірку антивірусними засобами і системами. Така система з приманками та пастками включатиме приманки, які здійснюють моніторинг зловмисного трафіку, тому вона може забезпечити максимально швидке його виявлення, а також виявлення патернів нових атак. Пастки при поєднанні їх в мережі можуть імітувати тіньову комп'ютерну мережу. Така система з приманок і пасток може бути комбінованою з них системою і для досягнення ефективного результату повинна включати тіньові приманки та пастки, які дозволять встановити та відслідкувати поведінку зловмисника при атаці, а також виявити ЗПЗ та КА з більшою вірогідністю. Важливим завданням, яке має бути вирішене при використанні таких систем полягає не тільки у застосуванні приманок та пасток, але й в управлінні їх використанням. Ефективність таких засобів суттєво залежить від організаційної складової частини системи. Використовуючи такі засоби в реальних системах, покращення ефективності може бути досягнуто за рахунок заміни оператора чи користувача на відповідну підсистему, яка зможе забезпечити ефективну організацію.

Антивірусні приманки та пастки як окремі частини системи можуть окремо приманками чи пастками, але можуть бути скомбіновані разом як окремі частини системи. Взаємодія їх функціоналів між собою може бути здійснена за потреби. Також, їх інтелектуалізація може стосуватись окремо приманок і окремо пасток, коли вони поєднані, але може і бути віднесеною до обох з них одночасно.

Використання лише програмної системи одночасно в якості і приманок та системи, в якій будуть прийматись рішення щодо наступного опрацювання отриманих подій в мережі приманок та пасток і окремих приманках та пастках, є недостатнім. Це пов'язано з особливостями проведення КА та поведінкою ЗПЗ при поширенні і виконанні деструктивних дій. Тобто, вплив ЗПЗ та КА відбувається програмними засобами і, тому, забезпечення протидії винятково програмними засобами не завжди забезпечує бажаний результат, що підтверджується і розробниками систем попередження і виявлення вторгнень та антивірусних засобів. Крім того, організація ефективної взаємодії між комп'ютерними станціями в корпоративних мережах для підтримки мережних застосунків суттєво залежить від часу передачі повідомлень і їх обробки. Враховуючи такі особливості при побудові приманок, пасток та мереж приманок і пасток необхідно синтезувати систему, в якій до процесу виявлення ЗПЗ та КА були б залучені, також, комп'ютерні станції в мережі. І така система могла б в процесі обробки отриманих даних з приманок та пасток приймати рішення

про свої наступні кроки, зокрема і в частині зміни конфігурування та використання комп'ютерних станцій в мережі.

Розглянемо досліджувані системи $\mathfrak{S}$ з виділенням в них множин синтезованих характеристик та властивостей:

$$\mathfrak{S} = \left\{ \left(\mathfrak{v}_1, \mathfrak{v}_2, \ldots, \mathfrak{v}_{10,1}, \mathfrak{v}_{11} \right) \middle| \left(\mathfrak{v}_1, \mathfrak{v}_2, \ldots, \mathfrak{v}_{10,1}, \mathfrak{v}_{11} \right) \in \right.$$
$$\left. \in \mathfrak{V}_1 \times \mathfrak{V}_2 \times \ldots \times \mathfrak{V}_{10,1} \times \mathfrak{V}_{11} \right\} \quad (1)$$

де $\mathfrak{V}_i$ ($i = n_{\mathfrak{V}}$, $n_{\mathfrak{V}}$ – кількість характеристик) – підмножини з елементами, що характеризують особливості архітектури систем; $\mathfrak{v}_{10,1}$ – елемент, що визначає наявність контролера в системі; $\mathfrak{v}_{10,1} \in \mathfrak{V}_{10,1}$; множина $\mathfrak{V}_{10,1}$ – одноелементна множина; $\mathfrak{v}_1, \mathfrak{v}_2, \ldots, \mathfrak{v}_9, \mathfrak{v}_{11}$ – позначення елементів в множинах $\mathfrak{V}_1, \mathfrak{V}_2, \ldots, \mathfrak{V}_9, \mathfrak{V}_{11}$ відповідно.

Таким чином, кількість систем типу $\mathfrak{S}$ є різною, але згідно формули (1) всіх їх поєднує наявність в їх архітектурі контролера. Кількість підмножин $\mathfrak{V}_i$ ($i = n_{\mathfrak{V}}$, $n_{\mathfrak{V}}$ – *кількість характеристик*) може бути різною, зокрема і менше, ніж $n_{\mathfrak{V}}$, але наявність одноелементної множини $\mathfrak{V}_{10,1}$ та множини $\mathfrak{V}_{11}$ в прямому добутку множин є обов'язковим.

Такий поділ архітектури систем за внутрішньою будовою дає змогу визначити необхідні елементи та компоненти в архітектурі системи, яка міститиме контролер та спеціалізований функціонал. Для створення мультикомп'ютерних систем з комбінованими приманками і пастками та контролером прийняття рішень для виявлення та протидії ЗПЗ і КА розробимо концептуальну модель архітектури такого класу систем $\mathfrak{S}$. Наявність такої моделі архітектури мультикомп'ютерних систем дасть змогу здійснити розроблення методологічних основ та методів створення таких систем. Введемо підмножини для таких елементів та компонентів в архітектурі системи і задамо загальну множину $\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}}$ для них так:

$$\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}} = \bigcup_{i=1}^{\mathfrak{n}_{\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}}}} \mathfrak{M}_i, \quad (2)$$

де $\mathfrak{M}_i$ – i – та підмножина для певних елементів та компонентів в архітектурі системи; $i = 1,2,\ldots,\mathfrak{n}_{\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}}}$; $\mathfrak{n}_{\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}}}$ – кількість підмножин.

Згідно формули (2) задамо кожну з введених підмножин $\mathfrak{M}_i$ ($i = 1,2,\ldots,\mathfrak{n}_{\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}}}$; $\mathfrak{n}_{\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}}}$ – кількість підмножин) її елементами та встановимо для кожного з них в межах заданих підмножин їх вплив на безпеку системи. Визначення рівня безпеки конкретних елементів та компонентів в архітектурі системи задамо множиною функцій, кожна з функцій якої буде застосовна до елементів конкретної заданої підмножини $\mathfrak{M}_i$ ($i = 1,2,\ldots,\mathfrak{n}_{\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}}}$; $\mathfrak{n}_{\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}}}$ – кількість підмножин).

Задамо кожну з підмножин елементів та компонентів в архітектурі мультикомп'ютерних систем класу $\mathfrak{S}$ через їх елементи так:

$$\mathfrak{M}_j = \left\{ \mathfrak{m}_{j,1}, \mathfrak{m}_{j,2}, \ldots, \mathfrak{m}_{j,\mathfrak{n}_{\mathfrak{M}_j}} \right\}; \quad (3)$$
$$\mathfrak{M}_{10} = \left\{ \mathfrak{m}_{10,1} \right\},$$

де $\mathfrak{m}_{j,l}$ – l-елемент $\mathfrak{M}_j$ підмножини; $l = 1,2,\ldots,\mathfrak{n}_{\mathfrak{M}_j}$; $j = 1,2,\ldots,9,11,\ldots,\mathfrak{n}_{\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}}}$; $\mathfrak{n}_{\mathfrak{M}_j}$ – кількість елементів підмножини $\mathfrak{M}_j$; $\mathfrak{n}_{\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}}}$ – кількість підмножин.

Елемент підмножини $\mathfrak{M}_{10}$ є твірним і визначальним для формування архітектури систем класу $\mathfrak{S}$. Тому, підмножина $\mathfrak{M}_{10}$ в формулі (3) визначена одним елементом. Множина $\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}}$ буде містити всі елементи підмножин $\mathfrak{M}_j$ ($j = 1,2,\ldots,\mathfrak{n}_{\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}}}$; $\mathfrak{n}_{\mathfrak{M}_j}$ – кількість елементів підмножини $\mathfrak{M}_j$). В архітектурі системи класу $\mathfrak{S}$ елементи множини $\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}}$ можуть бути всі або може бути частина з них. Також, може бути варіант формування системи згідно входження по одному елементу з кожної із підмножин $\mathfrak{M}_j$ ($j = 1,2,\ldots,\mathfrak{n}_{\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}}}$; $\mathfrak{n}_{\mathfrak{M}_j}$ – кількість елементів підмножини $\mathfrak{M}_j$). Тобто варіантів архітектури системи класу $\mathfrak{S}$ з комбінуванням елементів множини $\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}}$ може бути багато, але в загальному випадку їх кількість є скінченою.

Введемо множину функцій $\mathfrak{F} = \left\{ \mathfrak{f}_1, \mathfrak{f}_2, \ldots, \mathfrak{f}_{\mathfrak{n}_{\mathfrak{F}}} \right\}$ ($\mathfrak{n}_{\mathfrak{F}}$ – кількість функцій в множині $\mathfrak{F}$), в якій функції будуть виконувати операції над елементами множини $\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}}$ як окремими одноелементними множинами. Ці функції будуть діями над елементами множини $\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}}$ і результатом цих дій буде формування різних підмножин. Такі підмножини відображатимуть архітектуру системи класу $\mathfrak{S}$. Серед цих функцій будуть такі: об'єднання елементів; вилучення елементу з підмножини; перетворення підмножини з декількох елементів на декілька одноелементних підмножин; об'єднання декількох підмножин, зміна елементів в підмножинах та інших. Таким чином, елементи множини $\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}}$ будемо розглядати як одноелементні множини, тоді результатом виконання функцій з множини $\mathfrak{F}$ будуть підмножини з елементів множини $\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}}$, тобто множини підмножин $\mathfrak{P}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})$. Функції будуть операторами в множині $\mathfrak{P}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})$. Функції компонують систему класу $\mathfrak{S}$ з елементів підмножин. При цьому можуть бути одиничні елементи, а також можуть бути комбіновані варіанти з одиничних варіантів. Це досягається за рахунок розширення кількості елементів та, відповідно, їх комбінувань при переході до мно-

жини $\mathfrak{P}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})$. Підмножина $\mathfrak{M}_{10}$ буде визначена одним елементом і вона буде присутня в усіх варіантах поєднань підмножин, тобто елемент цієї множини буде в кожному об'єднанні підмножин. Інакше, не всі елементи множини підмножин $\mathfrak{P}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})$ формуватимуть архітектури систем класу $\mathfrak{S}$. Таке обмеження до підмножин множини $\mathfrak{P}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})$ є обов'язковим. В результати підмножини міститимуть об'єднання мінімум двох різних множин, одна з яких буде містити твірний елемент класу. Тому, одноелементних підмножин в множині $\mathfrak{P}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})$ не буде. Таким чином, буде справедливе функційне відображення в множині підмножин $\mathfrak{P}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})$:

$$\mathfrak{P}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}}) \xrightarrow{\mathfrak{F}} \mathfrak{P}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}}). \quad (4)$$

Співвідношення, яке задане формулою (4), означає, що при виконанні функцій з множини $\mathfrak{F}$ здійснюється перехід до іншого елемента з множини $\mathfrak{P}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})$. Для систем класу $\mathfrak{S}$ це відображатиме зміну їх архітектури.

Введемо на множині $\mathfrak{P}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})$ предикати, які будуть відображати результати входження та не входження елементів в підмножинах. І, відповідно, вони формуватимуть з елементів та компонентів відомості про певну архітектуру системи класу $\mathfrak{S}$. Задамо множину предикатів $\mathfrak{P}_{\mathfrak{M}} = \left\{\mathfrak{p}_1, \mathfrak{p}_2, \ldots, \mathfrak{p}_{\mathfrak{n}_{\mathfrak{P}_{\mathfrak{M}}}}\right\}$ ($\mathfrak{n}_{\mathfrak{P}_{\mathfrak{M}}}$ – кількість предикатів в множині $\mathfrak{P}_{\mathfrak{M}}$) таким чином, щоб кожен з предикатів буде задавати наявність чи відсутність елементів множини $\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}}$ в елементах-підмножинах множини $\mathfrak{P}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})$. Якщо підмножини множини $\mathfrak{P}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})$ будуть об'єднані і, при цьому, будуть мати різну кількість елементів, тобто буде об'єднано декілька підмножин з різними елементами і різною їх кількістю, тоді до кожної з них будуть застосовуватись різні предикати, а результат їх виконання буде сформовано множиною векторів. Підмножина буде містити елементи множини $\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}}$ і їх кількість може бути меншою за загальну кількість елементів множини $\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}}$, а вектор з компонентами буде мати кількість компонент, що дорівнює кількості елементів множини $\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}}$. Якщо буде дві і більше підмножини з множини $\mathfrak{P}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})$, тоді результатом виконання предикатів на їх елементах буде множина векторів такої ж кількості. Таким чином, задамо відображення для елементів множини підмножини $\mathfrak{P}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})$, тобто підмножини, у вектор так:

$$\mathfrak{P}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}}) \xrightarrow{\mathfrak{P}_{\mathfrak{M}}} \mathfrak{W}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}}), \quad (5)$$

де $\mathfrak{W}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})$ – множина векторів.

Елементи множини векторів $\mathfrak{W}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})$ позначимо $\mathfrak{w}_{\mathfrak{j}} = \left(\mathfrak{w}_{\mathfrak{j},1}, \mathfrak{w}_{\mathfrak{j},2}, \ldots, \mathfrak{w}_{\mathfrak{j},\mathfrak{n}_{\mathfrak{M}_{\mathfrak{v}}}}\right)$, де $\mathfrak{w}_{\mathfrak{j}} \in \mathfrak{W}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})$, $\mathfrak{i} = 1,2,\ldots,\mathfrak{n}_{\mathfrak{M}_{\mathfrak{v}}}$, $\mathfrak{n}_{\mathfrak{M}_{\mathfrak{v}}}$ – загальна кількість елементів і компонентів в архітектурі системи класу $\mathfrak{S}$, $\mathfrak{j} = 1,2,\ldots,\mathfrak{n}_{\mathfrak{W}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})}$, $\mathfrak{n}_{\mathfrak{W}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})}$ – кількість елементів в множині $\mathfrak{W}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})$. Після виконання певної функції з множини функцій $\mathfrak{F}$ згідно з формулою (4) можливим варіантом може бути поєднання двох або більше підмножин чи зменшення кількості поєднаних підмножин. Тоді, в такому випадку кожну з підмножин множини $\mathfrak{P}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})$ після виконання предикатів задамо вектором і об'єднаємо їх в множину, яка буде множиною підмножин з елементів векторів $\mathfrak{P}(\mathfrak{W}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}}))$.

Базовою множиною, в яку буде відображатись результат виконання предикату до одного елементу одноелементної підмножини, буде двохелементна множина $\{0,1\}$. Тоді, для певної підмножини визначення значень координат векторів задамо так:

$$\mathfrak{w}_{\mathfrak{j},\mathfrak{i}} = \begin{cases} 0, \textit{якщо елемент відсутній в підмножині}; \\ 1, \textit{якщо елемент наявний в підмножині}; \end{cases} \quad (6)$$

$$\mathfrak{w}_{10,1} = 1,$$

$\mathfrak{i} = 1,2,\ldots,\mathfrak{n}_{\mathfrak{M}_{\mathfrak{v}}}$, $\mathfrak{n}_{\mathfrak{M}_{\mathfrak{v}}}$ – загальна кількість елементів і компонентів в архітектурі системи класу $\mathfrak{S}$, $\mathfrak{j} = 1,2,\ldots,\mathfrak{n}_{\mathfrak{W}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})}$, $\mathfrak{n}_{\mathfrak{W}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})}$ – кількість елементів в множині $\mathfrak{W}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})$.

Таким чином, архітектура мультикомп'ютерних систем з комбінованими приманками і пастками та контролером прийняття рішень для виявлення та протидії ЗПЗ і КА в корпоративних мережах в поточний момент часу визначатиметься елементом множини $\mathfrak{P}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})$ так:

$$\mathfrak{P}_{\mathfrak{k}}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}}) \in \mathfrak{P}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}}), \quad (7)$$

де $\mathfrak{P}_{\mathfrak{k}}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})$ – $\mathfrak{k}$ – тий елемент множини $\mathfrak{P}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})$; $\mathfrak{k} = 1,2,\ldots,\mathfrak{n}_{\mathfrak{V}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})}$; $\mathfrak{n}_{\mathfrak{V}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})}$ – кількість елементів в множині $\mathfrak{V}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})$.

Згідно формул (2)-(7) задамо архітектуру мультикомп'ютерних систем з комбінованими приманками і пастками та контролером прийняття рішень алгебраїчною системою типу $\tau = (\alpha, \beta)$ так:

$$\mathfrak{A}_{\mathfrak{S}} = \mathfrak{P}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}}), \mathfrak{F}, \mathfrak{P}_{\mathfrak{M}}, \quad (8)$$

де $\mathfrak{F}$ – множина функцій заданих на множині $\mathfrak{P}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})$; $\mathfrak{P}_{\mathfrak{M}}$ – множина предикатів заданих на множині $\mathfrak{P}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})$; $\alpha = \mathfrak{n}_{\mathfrak{V}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})}$, $\beta = 1$ – арності операцій, тому тип системи $\tau = \left(\mathfrak{n}_{\mathfrak{V}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})}, 1\right)$; $\mathfrak{n}_{\mathfrak{V}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})}$ – кількість елементів в множині $\mathfrak{V}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})$.

В системі класу $\mathfrak{S}$, яку задано формулою (8), виділено елементи та компоненти множиною їх властивостей і зв'язки між ними. Елементи відображають в архітектурі системи її цілісні частини, а компоненти відображають розподі-

лені частини. Кожен з таких елементів та компоненті при деталізації міститиме елементи, які будуть ієрархічно структурованими. Система, крім визначених функційних завдань, які формуватимуть процеси в ній, має свої внутрішні особливості сформовані елементами множини $\mathfrak{V}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})$ та функціями і предикатами, які на них впливатимуть. Це формуватиме внутрішні процеси в ній і буде надавати їй власні властивості, які формуватимуться згідно поєднання властивостей, визначених для неї в поточний момент часу елементами множини $\mathfrak{V}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})$.

Якщо враховувати в архітектурі наявність лише елементів та компонентів з яких вона буде сформована в певні поточні моменти часу і, при цьому, не враховувати події, які призвели до зміни її архітектури, тобто які саме функції були виконані для зміни її архітектури, тоді модель архітектури такого класу систем $\mathfrak{S}$ задамо за формулою (9):

$$\mathfrak{A}_{\mathfrak{M},\mathfrak{S}} = \left\langle \mathfrak{P}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}}), \mathfrak{P}_{\mathfrak{M}} \right\rangle; \qquad (9)$$

$$\forall \mathfrak{k} : \mathfrak{V}_{10,1} \subset \mathfrak{P}_{\mathfrak{k}}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}}),$$

де $\mathfrak{P}_{\mathfrak{M}}$ – множина предикатів заданих на множині $\mathfrak{P}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})$; $\alpha = \mathfrak{n}_{\mathfrak{V}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})}$, $\beta = 1$ – арності операцій, тому тип системи $\tau = \left(\mathfrak{n}_{\mathfrak{V}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})}, 1\right)$; $\mathfrak{n}_{\mathfrak{V}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})}$ – кількість елементів в множині $\mathfrak{V}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})$, $\mathfrak{P}_{\mathfrak{k}}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})$ – $\mathfrak{k}$ – тий елемент множини $\mathfrak{P}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})$; $\mathfrak{k} = 1,2,\ldots,\mathfrak{n}_{\mathfrak{V}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})}$; $\mathfrak{n}_{\mathfrak{V}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})}$ – кількість елементів в множині $\mathfrak{V}(\mathfrak{M}_{\mathfrak{S}})$; $\mathfrak{V}_{10,1} = \{\mathfrak{v}_{10,1}\}$; множина $\mathfrak{V}_{10,1}$ – одноелементна множина.

Концептуальну модель архітектури системи задано не тільки виразом, в якому визначено величину $\mathfrak{A}_{\mathfrak{M},\mathfrak{S}}$, але й умовами та обмеженнями щодо її елементів в контексті поставленої проблеми. Модель задана формулою (9) є концептуальною моделлю архітектури такого класу систем $\mathfrak{S}$, оскільки в ній враховані властивості, що синтезовані в її архітектурі, та їх активізація в поточні моменти часу. Ці синтезовані властивості системи реалізовані елементами та компонентами системи. Так задана концептуальна модель є абстрактною моделлю, бо встановлює синтезовані властивості і зв'язки між ними в архітектурі мультикомп'ютерних систем класу $\mathfrak{S}$ їх формальним описом. Для повного задання всіх елементів концептуальної моделі в частині її внутрішнього наповнення потрібно розробити механізми функціонування елементів та компонентів в архітектурі системи, їх взаємодії, логіки формування та виконання процесів в них і між ними. Також, доповненням до запропонованої концептуальної моделі мають бути результати дослідження щодо обмеження до її застосування чи її повноти поширення на розглядуваний клас систем $\mathfrak{S}$. Тобто, запропонована концептуальна модель повинна охоплювати всі архітектури систем класу $\mathfrak{S}$. Крім цього, в так синтезованій архітектурі згідно моделі $\mathfrak{A}_{\mathfrak{M},\mathfrak{S}}$ не повинна формуватись нова якість системи, яка б відносила систему до іншого класу систем, відмінного від класу систем $\mathfrak{S}$. Така якість може формуватись на рівні розв'язання поставлених завдань для системи і реалізованих в ній методів, але не формування іншого класу систем.

Запропонована концептуальна модель архітектури мультикомп'ютерних систем потребуватиме її деталізації до рівня типових елементів та компонентів і, відповідно, доповнення її відображенням зв'язків між ними. Для такого подання систем класу $\mathfrak{S}$ через їх концептуальну модель було доведено повноту такого подання, а також неможливість формування нової якості в таких системах і віднесення їх до іншого класу систем.

Постановка експерименту, показники ефективності та аналіз результатів експериментальних досліджень. Важливими характеристиками в контексті синтезованих систем певного класу та призначення є їх стійкість та рівновага. Оскільки, розглядуваний клас систем охоплює комп'ютерні станції корпоративної мережі, а зв'язок між ними формується за рахунок проміжного програмного забезпечення, що створює мультикомп'ютерну систему, тобто розподілену систему, то стійкість таких систем та їх рівновага є важливими характеристиками і потребують дослідження. Крім того, для аналізу цих двох характеристик потрібно досліджувати час як показник впливу на них і на результат виконання завдання спеціалізованим функціоналом системи.

Введемо три цільові функції $\mathfrak{F}_{\mathfrak{i}}^{\mathfrak{E}}$ ($\mathfrak{i} = 1,2,3$), які будуть характеризувати відповідно стійкість, рівновагу та результат виконання завдання спеціалізованим функціоналом системи. Результат виконання кожної з цих функцій буде відображено в проміжок [0;1]. Середньоарифметичні значення цих трьох функцій будуть встановлювати три коефіцієнти для характеристики системи:

$$\mathfrak{k}_{\mathfrak{F}_{\mathfrak{i}}^{\mathfrak{E}}}^{\mathfrak{E}} = \frac{\sum_{\mathfrak{j}=1}^{\mathfrak{n}_{\mathfrak{F}_{\mathfrak{i}}^{\mathfrak{E}}}^{\mathfrak{E}}} \mathfrak{F}_{\mathfrak{i}}^{\mathfrak{E}}\left(\mathfrak{t}_{\mathfrak{j}}\right)}{\mathfrak{n}_{\mathfrak{F}_{\mathfrak{i}}^{\mathfrak{E}}}^{\mathfrak{E}}}, \qquad (10)$$

де $\mathfrak{t}_{\mathfrak{j}}$ – час від початку функціонування системи; $\mathfrak{j}$ – індекс для часу, що відображає $\mathfrak{j}$ – тий момент фіксування часу в системі; $\mathfrak{j} = 1,2,\ldots,\mathfrak{n}_{\mathfrak{F}_{\mathfrak{i}}^{\mathfrak{E}}}^{\mathfrak{E}}$; $\mathfrak{n}_{\mathfrak{F}_{\mathfrak{i}}^{\mathfrak{E}}}^{\mathfrak{E}}$ – кількість фіксувань часу, які було здійснено системою; $\mathfrak{F}_{\mathfrak{i}}^{\mathfrak{E}}\left(\mathfrak{t}_{\mathfrak{j}}\right)$ ($\mathfrak{i} = 1,2,3$) – функції, які

характеризують стійкість, рівновагу та результат виконання завдання спеціалізованим функціоналом системи; $\mathfrak{k}^{\mathfrak{E}}_{\mathfrak{F}^{\mathfrak{E}}_{i}}$ $(i=1,2,3)$ – коефіцієнти, які характеризують рівні стійкості, рівноваги та результату виконання завдання спеціалізованим функціоналом системи.

Введемо інтегрований показник характеристики системи, в якому будуть відображені коефіцієнти рівнів стійкості, рівноваги та результату виконання завдання спеціалізованим функціоналом системи, а також кількість компонентів системи.

$$\mathfrak{k}^{\mathfrak{E}}_{\mathfrak{I}}=\frac{\sum_{j=1}^{n^{\mathfrak{E}}_{\mathfrak{I}}}\mathfrak{k}^{\mathfrak{E}}_{\mathfrak{F}^{\mathfrak{E}}_{i}}}{n^{\mathfrak{E}}_{\mathfrak{I}}}\cdot\frac{n_1}{n_2}, \qquad (11)$$

де $n^{\mathfrak{E}}_{\mathfrak{I}}$ – кількість коефіцієнтів; $\mathfrak{F}^{\mathfrak{E}}_{i}(t_j)$ $(i=1,2,\ldots,n^{\mathfrak{E}}_{\mathfrak{I}})$ – функції, які характеризують стійкість, рівновагу та результат виконання завдання спеціалізованим функціоналом системи; $\mathfrak{k}^{\mathfrak{E}}_{\mathfrak{F}^{\mathfrak{E}}_{i}}$ $(i=1,2,\ldots,n^{\mathfrak{E}}_{\mathfrak{I}})$ – значення коефіцієнтів; n_1 – кількість компонентів в системі; n_2 – кількість комп'ютерних станцій в корпоративній мережі.

Для проведення експерименту з системою, яку побудовано згідно запропонованої моделі архітектури за формулою (9), було здійснено запуск системи та забезпечено її функціонування протягом 180 годин. Також, для залучення спеціалізованого функціоналу було активовано п'ять штучних комп'ютерних атак. Для обробки подій пов'язаних з ними були використані приманки. Кількість фіксованих часових значень за у весь час функціонування становив 50, тобто за увесь час функціонування системи було отримано 50 значень усіх характеристичних показників.

Результати значень інтегрального коефіцієнту, трьох коефіцієнтів та проміжних величин такі: $\mathfrak{k}^{\mathfrak{E}}_{\mathfrak{F}^{\mathfrak{E}}_{1}}=0{,}78452$; $\mathfrak{k}^{\mathfrak{E}}_{\mathfrak{F}^{\mathfrak{E}}_{2}}=0{,}69433$; $\mathfrak{k}^{\mathfrak{E}}_{\mathfrak{F}^{\mathfrak{E}}_{3}}=0{,}91521$; $n_1=100$; $n_2=120$; $n^{\mathfrak{E}}_{\mathfrak{F}^{\mathfrak{E}}_{i}}=50$. Таким чином, значення інтегрального коефіцієнту $\mathfrak{k}^{\mathfrak{E}}_{\mathfrak{I}}=0{,}66502$. Такі результати отримано саме для систем з наявним контролером. При використанні систем без контролера при проведенні такого ж есперименту було отримано таке значення інтегрального коефіцієнту $\mathfrak{k}^{\mathfrak{E}}_{\mathfrak{I}}=0{,}64892$. Тобто, певна ефективність в таких системах з контролером досягнута. Вона зростатиме при інтенсивнішому і тривалішому їх використанні. Тоді, кількість оброблюваних подій зростатиме, що вимагатиме постійного використання контролеру, який надає переваги системі порівняно з системами без контролера. Крім того, на результат впливає також і кількість розміщених в корпоративній мережі компонент системи. Якщо їх кількість менша за кількість комп'ютерних станцій, то тоді ефективність такої системи буде меншою.

Висновки. Розроблено концептуальну модель архітектури мультикомп'ютерних систем приманок та пасток для виявлення та протидії ЗПЗ та КА, в якій синтезовано характерні властивості. Обов'язковою характерною властивістю в цій моделі є наявність контролера.

Запропонована методика розрахунку ефективності мультикомп'ютерних систем. Результати проведеного експерименту підтверджують перспективність досліджень в напрямі використання контролера в мультикомп'ютерних системах приманок та пасток для виявлення та протидії ЗПЗ та КА.

Запропонована концептуальна модель архітектури мультикомп'ютерних систем потребуватиме її деталізації до рівня типових елементів та компонентів і, відповідно, доповнення її відображенням зв'язків між ними. Тому, напрямом подальших досліджень буде розробка компонентів системи та встановлення зв'язків між ними.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Zobal L. D. Kolář, R. Fujdiak. Current State of Honeypots and Deception Strategies in Cybersecurity. *11th International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). Dublin, Ireland*, 2019. P. 1-9.

2. Almeshekah M.H., Spafford E.H. Cyber Security Deception. Cyber Deception. *Springer, Cham*, 2016.

3. Fraunhol D., Anton S.D., Lipps C., Reti D., Krohmer D., Pohl F., Tammen M., Schotten D. Demystifying Deception Technology: A Survey. arXiv:1804.06196v1 [cs.CR] 17 Apr 2018 1, 2.

4. Zielinski D., Kholidy H.A. An Analysis of Honeypots and their Impact as a Cyber Deception Tactic. arXiv:2301.00045v1.

5. Acosta, J.C., Basak, A., Kiekintveld, C., Kamhoua C. Lightweight On-Demand Honeypot Deployment for Cyber Deception. *In: Gladyshev, P., Goel, S., James, J., Markowsky, G., Johnson, D. (eds) Digital Forensics and Cyber Crime. ICDF2C 2021. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*. *Springer, Cham.* 2019. Vol. 441. P. 1-18.

6. Anwar A.H., Kamhoua C.A., Leslie N.O., Kiekintveld C. Honeypot Allocation for Cyber Deception Under Uncertainty. *IEEE Transactions on Network and Service Management*. Sept. 2022. Vol. 19, no. 3, pp. 3438-3452.

7. Tsikerdekis M., Zeadally S., Schlesener A. Sklavos N., Approaches for Preventing Honeypot Detection and Compromise. *2018 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS), Thessaloniki, Greece*. 2018. P. 1-6.

8. Mphago B., Shedden M.D.M. Deception in Web Application Honeypots: Case of Glastopf. *International Journal of Cyber-Security and Digital Forensics.* 2017. Vol. 6: P. 179-185.

9. Sayed M.A., Anwar A.H., Kiekintveld C. Kamhoua C. Honeypot Allocation for Cyber Deception in Dynamic Tactical Networks: A Game Theoretic Approach. arXiv:2308.11817v2 [cs.GT] 5 Sep 2023.

10. Anwar A.H., Kamhoua C.A. Cyber Deception using Honeypot Allocation and Diversity: A Game Theoretic Approach. *2022 IEEE 19th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, *Las Vegas, NV, USA*. 2022. P. 543-549.

11. Katakwar H., Aggarwal P., Maqbool Z. Front V.D. Influence of Network Size on Adversarial Decisions in a Deception Game Involving Honeypots. *Front. Psychol.*, 25 September 2020 Sec. Cognition Volume 11, P. 1-13.

12. Çeker H., Zhuang J., Upadhyaya S., La Q.D. Soong, BH. Deception-Based Game Theoretical Approach to Mitigate DoS Attacks*. Decision and Game Theory for Security. GameSec 2016. Lecture Notes in Computer Science*. *Springer, Cham.* Vol 9996.

13. Huang L. Zhu Q. Duplicity Games for Deception Design With an Application to Insider Threat Mitigation. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security.* 2021. Vol. 16, P. 4843-4856.

14. Anwar A.H., Zhu M., Z. Z., Cho J. -H., Kamhoua C. A., Singh M. P. Honeypot-Based Cyber Deception Against Malicious Reconnaissance via Hypergame Theory. *GLOBECOM 2022 – 2022 IEEE Global Communications Conference, Rio de Janeiro, Brazil.* 2022, P. 3393-3398.

15. Razali M.F., Razali M. N., Mansor F. Z., Muruti G., Jamil N. IoT Honeypot: A Review from Researcher's Perspective*," 2018 IEEE Conference on Application, Information and Network Security (AINS)*, *Langkawi, Malaysia*. 2018. P. 93-98.

16. Priya V.S.D., Chakkaravarthy S.S. Containerized cloud-based honeypot deception for tracking attackers. *Sci Rep 13.* 2023. Vol. 1437

17. Sikos, L.F., Valli, C., Grojek, A.E. et al. CamDec: Advancing Axis P1435-LE video camera security using honeypot-based deception. *J Comput Virol Hack Tech (2023)*. 2023.

18. Feng, M. et al. A Novel Deception Defense-Based Honeypot System for Power Grid Network. *In: Qiu, M., Gai, K., Qiu, H. (eds) Smart Computing and Communication. SmartCom 2021. Lecture Notes in Computer Science. Springer, Cham.* 2022. Vol. 13202*.*

19. Abe S., Tanaka Y., Uchida Y., Horata S. Developing Deception Network System with Traceback Honeypot in ICS Network. *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, *11:4*. 2018. P. 372-379.

20. Wegerer M., Tjoa S. Defeating the Database Adversary Using Deception – A MySQL Database Honeypot. *International Conference on Software Security and Assurance (ICSSA)*, *Saint Pölten, Austria.* 2016, P. 6-10.

21. URL: https://www.acalvio.com/product/ 04.09.2023

22. URL: https://www.countercraftsec.com/ 13.09.2023

23. URL: https://www.sentinelone.com/surfaces/identity/ 12.09.2023

24. URL:https://www.proofpoint.com/us/illusive-is-now-proofpoint 12.09.2023

25. URL: https://fidelissecurity.com/platforms/fidelis-deception/ 13.09.2023

REFERENCES:

1. Zobal L. D. Kolář, R. Fujdiak. (2019). Current State of Honeypots and Deception Strategies in Cybersecurity. *11th International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*. *Dublin, Ireland*. P. 1-9.

2. Almeshekah M.H., Spafford E.H. (2016). Cyber Security Deception. Cyber Deception. *Springer, Cham*.

3. Fraunhol D., Anton S.D., Lipps C., Reti D., Krohmer D., Pohl F., Tammen M., Schotten D. Demystifying Deception Technology: A Survey. arXiv:1804.06196v1 [cs.CR] 17 Apr. 2018 1, 2.

4. Zielinski D., Kholidy H.A. An Analysis of Honeypots and their Impact as a Cyber Deception Tactic. arXiv:2301.00045v1.

5. Acosta, J.C., Basak, A., Kiekintveld, C., Kamhoua C. (2019). Lightweight On-Demand Honeypot Deployment for Cyber Deception. *In: Gladyshev, P., Goel, S., James, J., Markowsky, G., Johnson, D. (eds) Digital Forensics and Cyber Crime. ICDF2C 2021. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*. *Springer, Cham.* Vol. 441. P. 1-18.

6. Anwar A.H., Kamhoua C.A., Leslie N.O., Kiekintveld C. (2022). Honeypot Allocation for Cyber Deception Under Uncertainty. *IEEE Transactions on Network and Service Management*. Sept. Vol. 19, no. 3, pp. 3438-3452.

7. Tsikerdekis M., Zeadally S., Schlesener A. Sklavos N. (2018). Approaches for Preventing Honeypot Detection and Compromise. *2018 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS), Thessaloniki, Greece*. P. 1-6.

8. Mphago B., Shedden M.D.M. (2017). Deception in Web Application Honeypots: Case of Glastopf. *International Journal of Cyber-Security and Digital Forensics.* Vol. 6: P. 179-185.

9. Sayed M.A., Anwar A.H., Kiekintveld C. Kamhoua C. Honeypot Allocation for Cyber Deception in Dynamic Tactical Networks: A Game Theoretic Approach. arXiv:2308.11817v2 [cs.GT] 5 Sep 2023.

10. Anwar A.H., Kamhoua C.A. (2022). Cyber Deception using Honeypot Allocation and Diversity: A Game Theoretic Approach. *2022 IEEE 19th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, *Las Vegas, NV, USA*. P. 543-549.

11. Katakwar H., Aggarwal P., Maqbool Z. Front V.D. Influence of Network Size on Adversarial Decisions in a Deception Game Involving Honeypots. *Front. Psychol.*, 25 September 2020 Sec. Cognition Volume 11, P. 1-13.

12. Çeker H., Zhuang J., Upadhyaya S., La Q.D. Soong, BH. Deception-Based Game Theoretical Approach to Mitigate DoS Attacks*. Decision and Game Theory for Security. GameSec 2016. Lecture Notes in Computer Science*. *Springer, Cham.* Vol 9996.

13. Huang L. Zhu Q. (2021). Duplicity Games for Deception Design With an Application to Insider Threat Mitigation. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security.* Vol. 16, P. 4843-4856.

14. Anwar A.H., Zhu M., Z. Z., Cho J. -H., Kamhoua C. A., Singh M. P. (2022). Honeypot-Based Cyber Deception Against Malicious Reconnaissance via Hypergame Theory. *GLOBECOM 2022 – 2022 IEEE Global Communications Conference, Rio de Janeiro, Brazil.* P. 3393-3398.

15. Razali M.F., Razali M. N., Mansor F. Z., Muruti G., Jamil N. (2018). IoT Honeypot: A Review from Researcher's Perspective*," 2018 IEEE Conference on Application, Information and Network Security (AINS)*, *Langkawi, Malaysia*. P. 93-98.

16. Priya V.S.D., Chakkaravarthy S.S. (2023). Containerized cloud-based honeypot deception for tracking attackers. *Sci Rep 13.* Vol. 1437.

17. Sikos, L.F., Valli, C., Grojek, A.E. et al. (2023). CamDec: Advancing Axis P1435-LE video camera security using honeypot-based deception. *J Comput Virol Hack Tech (2023)*.

18. Feng, M. et al. (2022). A Novel Deception Defense-Based Honeypot System for Power Grid Network. *In: Qiu, M., Gai, K., Qiu, H. (eds) Smart Computing and Communication. SmartCom 2021. Lecture Notes in Computer Science. Springer, Cham.* Vol. 13202.

19. Abe S., Tanaka Y., Uchida Y., Horata S. (2018). Developing Deception Network System with Traceback Honeypot in ICS Network. *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, *11:4*. P. 372-379.

20. Wegerer M., Tjoa S. (2016). Defeating the Database Adversary Using Deception – A MySQL Database Honeypot. *International Conference on Software Security and Assurance (ICSSA)*, *Saint Pölten, Austria.* P. 6-10.

21. Retrieved from https://www.acalvio.com/product/ 04.09.2023

22. Retrieved from https://www.countercraftsec.com/ 13.09.2023

23. Retrieved from https://www.sentinelone.com/surfaces/identity/ 12.09.2023

24. Retrieved from https://www.proofpoint.com/us/illusive-is-now-proofpoint 12.09.2023

25. Retrieved from https://fidelissecurity.com/platforms/fidelis-deception/ 13.09.2023

УДК 004.9
DOI https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-4

Віта КАШТАН
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005, kashtan.v.yu@nmu.one
***ORCID:** 0000-0002-0395-5895*
***Scopus Author ID:** 57201902879*

Володимир ГНАТУШЕНКО
доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005, hnatushenko.v.v@nmu.one
***ORCID:** 0000-0003-3140-3788*
***Scopus Author ID:** 6505609275*

Ірина УДОВИК
кандидат технічних наук, доцент, деканка факультету інформаційних технологій, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005, udovyk.i.m@nmu.one
***ORCID:** 0000-0002-5190-841X*
***Scopus Author ID:** 55998874400*

Ольга ШЕВЦОВА
аспірантка кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005, shevtsova.o.s@nmu.one
***ORCID:** 0000-0002-0148-5877*
***Scopus Author ID:** 57220267804*

Бібліографічний опис статті: Каштан, В., Гнатушенко, В., Удовик, І., Шевцова, О. (2023). Розпізнавання та моніторинг водних об'єктів на оптичних супутникових зображеннях із використанням машинного навчання. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security,* 3, 32–42, doi: https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-4

РОЗПІЗНАВАННЯ ТА МОНІТОРИНГ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ НА ОПТИЧНИХ СУПУТНИКОВИХ ЗОБРАЖЕННЯХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Річки, озера та відкриті водойми є ключовими компонентами для розвитку навколишнього середовища, особливо в міських екосистемах. Точні карти міських поверхневих водних об'єктів на основі супутникових даних є важливою передумовою для кращого та швидшого прийняття рішень щодо моніторингу міських екосистем, впливу міських теплових островів та адаптації до зміни клімату. В роботі запропоновано інформаційну технологію розпізнавання та моніторингу водних об'єктів на оптичних супутникових зображеннях з використанням машинного навчання. Розроблена технологія складається з восьми етапів: завантаження первинних даних; геоприв'язка растрових зображень; попередня обробка даних; сегментація даних для визначення границь водних об'єктів та ділянки землі; оцифрування берегової лінії; створення бінарної маски; картографування контурів водних об'єктів з використанням топографічної карти та аналіз просторово-часових змін. Машинне навчання використовується для сегментації зображень, а метод опорних векторів (SVM) використовується для картографування контурів водних об'єктів. Це дозволяє отримати результати з субпіксельною точністю, забезпечуючи важливу інформацію для подальших досліджень та прийняття рішень.

Експерименти проведено на супутникових даних Sentinel-2 для моніторингу водних об'єктів з просторовим розрізненням 10 метрів. Областю дослідження стала берегова лінії Одеської області – Національний природний парк "Тузлівські лимани". Порівняльний кількісний аналіз з існуючими методами, такими як водні індекси та K-means, підтверджує високу точність розробленої технології протягом 2016–2023 років (точність від 96.96% до 97%). Коефіцієнт Каппа, який враховує ступінь узгодженості

між реальною та передбачуваною класифікацією, підтверджує високу стабільність та достовірність підходу (0.94).

Технологія моніторингу водних об'єктів на оптичних супутникових зображеннях з використанням машинного навчання може бути використана для дослідження змін на прибережних територіях, прийняття рішень в галузі управління прибережними ресурсами та земельним використанням.

Ключові слова: *машинне навчання, сегментація зображень, картографування, оцифрування берегової лінії, опорні вектори.*

Vita KASHTAN
Candidate of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of Department of Information Technology and Computer Engineering, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho Avenue, Dnipro, Ukraine, 49005, kashtan.v.yu@nmu.one
ORCID: *0000-0002-0395-5895*
Scopus Author ID: *57201902879*

Volodymyr HNATUSHENKO
Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department of Information Technology and Computer Engineering, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho ave., Dnipro, Ukraine, 49005, hnatushenko.v.v@nmu.one
ORCID: *0000-0003-3140-3788*
Scopus Author ID: *6505609275*

Iryna UDOVYK
Candidate of Technical Science, Associate Professor, Dean of Information Technologies Department, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho ave., Dnipro, Ukraine, 49005, udovyk.i.m@nmu.one
ORCID: *0000-0002-5190-841X*
Scopus Author ID: *55998874400*

Olha SHEVTSOVA
Postgraduate Student of the Department of Computer Systems Software, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho ave., Dnipro, Ukraine, 49005, shevtsova.o.s@nmu.one
ORCID: *0000-0002-0148-5877*
Scopus Author ID: *57220267804*

To cite this article: Kashtan, V., Hnatushenko, V., Udovyk, I., Shevtsova, O. (2023). Rozpiznavannia ta monitorynh vodnykh obiektiv na optychnykh suputnykovykh zobrazhenniakh iz vykorystanniam mashynnoho navchannia. [Recognition and monitoring of water objects on optical satellite images using machine learning]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security,* 3, 32–42, doi: https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-4

RECOGNITION AND MONITORING OF WATER OBJECTS ON OPTICAL SATELLITE IMAGES USING MACHINE LEARNING

Rivers, lakes, and open water objects are important components of environmental development, especially in urban ecosystems. Accurate maps of urban surface water objects based on satellite data are an essential prerequisite for better and faster decision-making in monitoring urban ecosystems, the impact of urban heat islands, and climate change adaptation.

The paper introduces an information technology for recognition and monitoring of water objects on optical satellite images using machine learning. The developed technology consists of eight steps: downloading primary data; georeferencing of raster images; data preprocessing; data segmentation to determine the boundaries between land and water; digitizing the coastline; creating a binary mask; mapping the contours of water bodies using a topographic map; and analyzing spatial and temporal changes. Machine learning is used for image segmentation, and support vector machine (SVM) is used for water body contour mapping. The result is sub-pixel accuracy, providing relevant information for further research and decision-making.

The experiments were conducted on Sentinel-2 data for monitoring water bodies with a spatial resolution of 10 meters. The subject area was the coastline of the Odesa region – the Tuzly Estuaries National Nature Park. Comparative quantitative analysis with existing methods, such as water indices and K-means, confirms the high accuracy of the developed technology during 2016-2023 (accuracy from 96.96% to 97%). The Kappa coefficient,

representing the degree of consistency between the actual and predicted classification, confirms the high stability and reliability of the approach (0.94).

The water objects monitoring technology on optical satellite images using machine learning has the potential to be used to study changes in coastal areas and to make decisions in the field of coastal resource and land use management.

Key words: *machine learning, image segmentation, mapping, coastline digitization, support vectors.*

Вступ. Вода є багатогранним природним ресурсом, що впливає на ключові аспекти міських екосистем. Надмірна експлуатація, зміни у землекористуванні, ґрунтовому покриві та зміна клімату мають негативний вплив на гідрологічний цикл, що призводить до змін поверхневих і підземних вод на Землі (Xiang et al., 2021). Дані, отримані від космічних супутників таких як Landsat, Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) і Satellite Pour l'Observation de la Terre (SPOT), Sentinel-1, 2, дозволяють проводити моніторинг повеней, оцінку водних ресурсів (Xie et.al., 2016), визначати якість води (Désirée Ruppen et al., 2023) та контроль за береговою лінією (Palomar-Vázquez, et al., 2022). Особливу увагу слід звертати на дослідження прибережних екотонних зон – унікальних областей, де суша зустрічається з водою і часто має водну рослинність. Ці екотони впливають на точність розпізнавання та класифікації водних об'єктів на супутникових зображеннях. Крім того, на оптичних супутникових знімках можуть бути хмари, їхні тіні, що ускладнює обробку таких даних та розпізнавання водних об'єктів. Таким чином, оптичні супутникові зображення мають потенціал надавати важливу інформацію для моніторингу водних об'єктів. З іншого боку, враховуючи вищенаведені труднощі, пов'язані з тінями від хмар і об'єктами із низьким альбедо (Chen et al., 2018), важливим є постійне вдосконалення методів розпізнавання водних об'єктів на супутникових зображеннях.

Літературний огляд. В даний час розроблено методи для розпізнавання, картографування, моніторингу водних об'єктів на супутникових зображеннях. Ці методи можна розділити на три групи: аналіз статистичного розпізнавання образів на основі пікселів, включаючи контрольовані (Mao et.al., 2018) і неконтрольовані (Nardini et al., 2023) підходи до класифікації; аналіз зображень з урахуванням таких параметрів як спектральні характеристики, текстура, складність форми (Li W et al., 2016) та субпіксельний аналіз (Xie et al., 2016). Для моніторингу водних об'єктів широко використовуються спектральні індекси води. Автори (Zhou et al., 2017) порівняли продуктивність різних індексів води в Landsat 7 ETM+, Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) і Sentinel-2 MSI. У роботі (Fisher et al., 2016) було запропоновано новий індекс води для супутників Landsat Thematic Mapper (TM)/Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)/OLI, заснований на коефіцієнті відбиття поверхні з використанням порогового значення. Цей метод оптимізований для обробки великого потоку даних і надає простий, але ефективний підхід для автоматизованої класифікації великих за площею водойм. Хоча існуючі методи засновані на спектральних індексах води можуть досягти високої точності для вилучення площ поверхневих вод, але вони не є ефективними при аналізі багатоспектральних супутникових зображень.

Методи класифікації, засновані на виділенні ознак і машинному навчанні, є передовою технікою для моніторингу поверхневих водних об'єктів, наприклад «випадковий ліс» (random forest) (Wangchuk et al., 2020), метод опорних векторів (Liu et al., 2020), XGBoost (Chatufale et al., 2022). З іншого боку, неконтрольовані методи класифікації не вимагають ніяких навчальних зразків і більше підходять для розробки автоматизованих алгоритмів. Згорткові нейронні мережі (CNN) є популярним методом глибокого навчання і широко використовуються для семантичної сегментації, виявлення хмар, вилучення водойм, тощо. Розроблено різноманітні нові моделі глибокого навчання для вилучення поверхневих водних об'єктів на основі космічних супутникових даних (Jiang et al., 2018), для яких важливою є багатомасштабна семантична інформація.

Метою роботи є підвищення ефективності розпізнавання та подальшого моніторингу водних об'єктів на цифрових оптичних супутникових зображеннях з використанням машинного навчання.

Матеріали та методи. Запропонована в роботі технологія моніторингу водних об'єктів складається з восьми етапів, представлених на рисунку 1.

Перший етап складається із завантаження знімків з 2016 по 2023 роки з оптичного супутника Sentinel-2 у літній період. Завантажуємо топографічні карти, які містять важливу інформацію про територію дослідження. Для картографування контурів водних об'єктів на топографічні карти

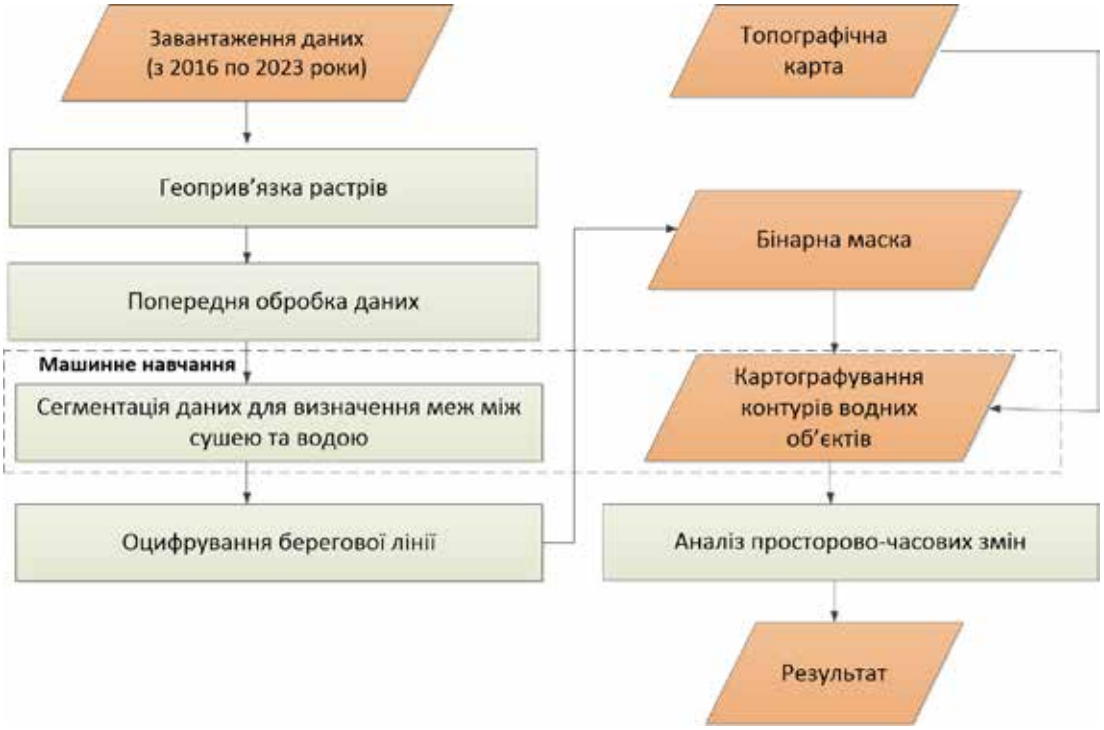


Рис. 1. Алгоритм запропонованої технології

а) б)

Рис. 2. Супутниковий знімок Тузлівських лиманів у літній період: а) 2016 рік; б) 2023 рік

використовується геопросторовий аналіз, де визначаються координати берегової лінії на карті.

Третім етапом є попередня обробка даних, яка включає в себе калібрування супутникових знімків, видалення атмосферного шуму і покращення контрастності. Завдання радіометричного калібрування полягає в перерахунку значень яскравості (Digital Number) у значення спектральної енергетичної яскравості на верхній межі атмосфери (Palomar-Vázquez, 2023) :

$$L_\lambda = M_L \cdot Q_C + A_L, \quad (1)$$

де L_λ – енергетична яскравість для спектральної зони; M_L – калібрувальний коефіцієнт масштабування; Q_C – каліброване значення; A_L – калібрувальна константа, яка відповідає мінімальній величині реєстрованої яскравості.

Для атмосферної корекції враховано пропускання електромагнітного випромінювання і власне світіння атмосфери. На цьому ж етапі було здійснено переведення значень пікселів з енергетичної яскравості в коефіцієнти відбивної здатності від 0 до 1:

$$p_\lambda = \frac{\pi \cdot L_\lambda \cdot D^2}{E_{sun\lambda} \cdot cos\theta}, \quad (2)$$

де L_λ – енергетична яскравість для спектральної зони [Вт/(ср≥м2-нм)]; D – відстань від

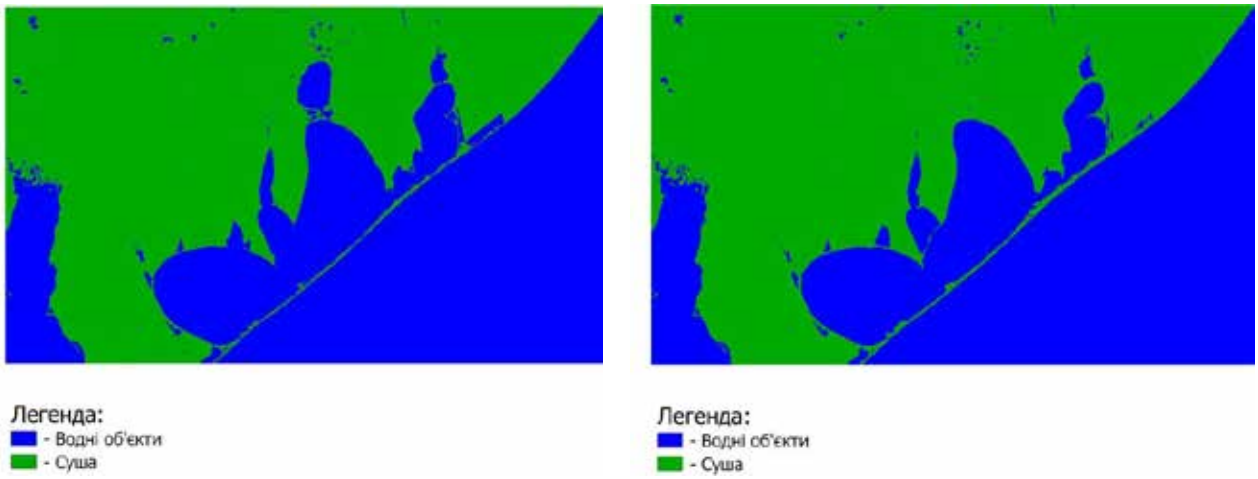


Рис. 3. Сегментація супутникового знімка за літній період: а) 2016 рік; б) 2023 рік

а) б)

Рис. 4. Бінарна маска супутникового знімка за: а) 2016 рік; б) 2023 р.

Землі до Сонця в астрономічних одиницях для конкретного періоду; $E_{sun\lambda}$ – середня сонячна позаатмосферна освітленість [Вт/(м2 нм)]; θ – кут піднесення сонця.

Сегментація даних є четвертим етапом і використовується для розпізнавання водних об'єктів на знімках, включаючи берегову лінію. Для цього використовувалась класифікація пікселів супутникових знімків на дві категорії: суша і водні об'єкти. На цьому етапі було використано метод кластеризації в поєднанні з Orfeo ToolBox (OTB) в QGIS для групування пікселів за їхніми спектральними характеристиками у різних каналах (червоний, зелений, синій і т.д.).

П'ятий етап відповідає за картографування берегової лінії та базується на морфологічних операціях та функціях.

Шостим етапом є отримання бінарної маски з контурами водних об'єктів за 2016 та 2023 роки. На цьому етапі використано метод порогового значення Отцу для визначення оптимального порогового значення сегментації водних об'єктів і суші.

Сьомим етапом є картографування контурів водних об'єктів на цифрових супутникових зображеннях. Вибір порогового значення є ключовим кроком у використанні підходів, заснованих на правилах, для картографування водойм. Тому було використано постійний параметр оптимізації SVM, який базується на статистичній теорії навчання та спрямований на визначення розташування меж прийняття рішень шляхом максимізації розриву між класами (Vapnik, 2013). У випадку двох лінійно роздільних класів SVM вибирає серед нескінченної кількості лінійних границь рішення оптимальну роздільну гіперплощину, яка мінімізує помилку узагальнення. Коли дані не є лінійно роздільними, SVM розширюється шляхом введення змінних slack і застосування функції ядра для вирішення проблеми оптимізації. Ядро радіальної базисної функції зазвичай тренується набагато швидше. Параметр *c* у *c*-SVM допомагає оптимізувати SVM, оскільки значення налаштовуються на основі вхідних даних.

Останнім етапом є проведення аналізу просторово-часових змін берегової лінії.

Експерименти. Тестування запропонованої в роботі інформаційної технології проводилось на прикладі берегової лінії Одеської

області, а саме Національного природного парку «Тузлівські лимани», розташованого у Татарбунарському районі. Цей парк включає в себе систему лиманів, таких як Шагани, Алібей та Бурнас, а також групу солоних лиманів лагунного типу. Від узбережжя Чорного моря ці лимани відокремлені піщаною косою завдовжки 29 кілометрів і шириною від 60 до 400 метрів. Національний природний парк був заснований у 2010 році з метою захисту унікальної і вразливої природи Причорномор'я (рис. 5).

Для аналізу зміни площі водного дзеркала Тузлівських лиманів, використано коефіцієнт Пірсона *r*:

$$r = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sum(x-\bar{x})^2 \sum(y-\bar{y})^2}, \quad (3)$$

де $\bar{x}, \bar{y}$ є середніми значеннями двох змінних x і y відповідно.

Для оцінки ефективності запропонованої в роботі технології моніторингу водних об'єктів було проведено обчислення двох метрик – загальної точності (Overall Accuracy, OA) та коефіцієнта Каппа (Kappa). Ці метрики надають об'єктивну оцінку та порівнюють ефективність розробленого методу з водними індексами та методом K-means (Yang et al., 2017):

$$OA = \frac{TP + TN}{T}, \quad (4)$$

$$Kappa = \frac{T \cdot (TP + TN) - \Sigma}{T \cdot T - \Sigma}, \quad (5)$$

де T – загальна кількість пікселів на знімку Sentinel-2; TP, TN – це категоризовані пікселі шляхом порівняння вилучених пікселів води з еталонною картою: TP істинні позитиви, тобто кількість правильних виділених пікселів; TN представляє собою кількість правильно визначених пікселів, які не є водними об'єктами і були правильно віднесені до іншого класу.

Результати. Отримані контури водних об'єктів були детально проаналізовані з використанням геоінформаційних технологій та інструментів, зокрема QGIS і мови програмування Python (рис. 6). Аналіз контурів водних об'єктів надав змогу визначити характер змін, їхню інтенсивність та розподіл вздовж берегової зони Тузлівських лиманів.

Для оцінки змін водних об'єктів та берегової лінії використано коефіцієнт кореляції Пірсона, який може мати значення в діапазоні від -1 до 1. Значення близьке до 1 вказує на сильний позитивний зв'язок між масками, значення близьке до -1 вказує на сильний негативний зв'язок, а значення близьке до 0 вказує на відсутність зв'язку. Результати значень коефіцієнта Пірсона, наведено у вигляді графіка на рис. 7.

Наступним етапом є аналіз середньорічної швидкості змін площі водних об'єктів Тузлівських лиманів в період з 2016 по 2023 рр. На цьому етапі виконано розрахунок площі водного дзеркала Тузлівських лиманів за 7 років:

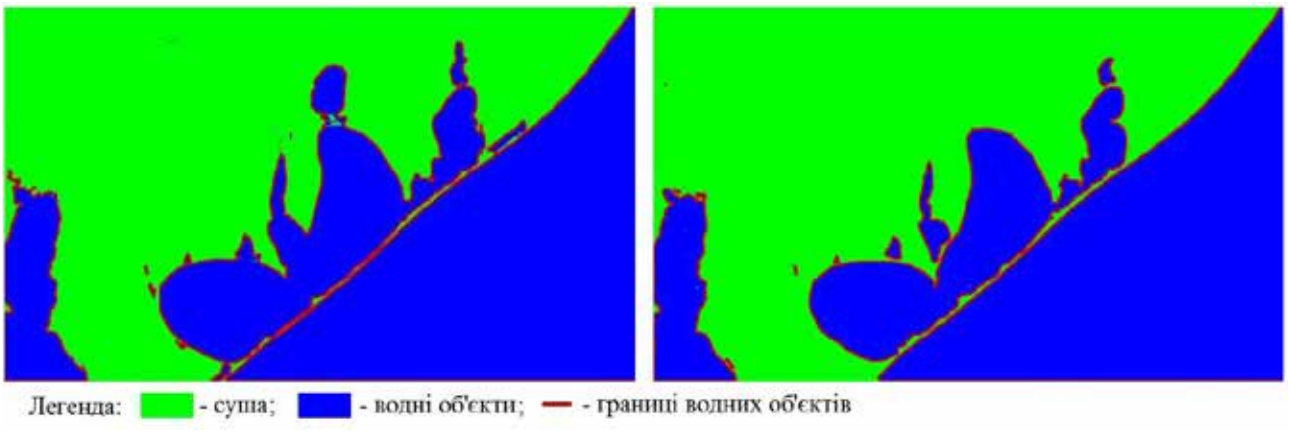
$$S = L \cdot W, \quad (6)$$

де L – довжина берегової лінії; W – ширина берегової лінії.

$$Середня\ річна\ швидкість = \frac{Сума\ приростів\ та\ втрат\ площі}{Кількість\ років} \approx 4.96\ км^2\ /\ рік \quad (7)$$

На рисунку 8 наведено графік змін площі водного дзеркала Тузлівських лиманів з 2016 по 2023 роки. З 2016 по 2018 рік спостерігалася стабільна тенденція втрати площі, а з 2019 по 2020 рік відбувся різкий спад. Найбільший приріст площі відбувся в 2020-2021 році, що вказує

Рис. 5. Область дослідження



а) б)

Рис. 6. Виділення водних об’єктів після сегментації: а) 2016 рік; б) 2023 р.

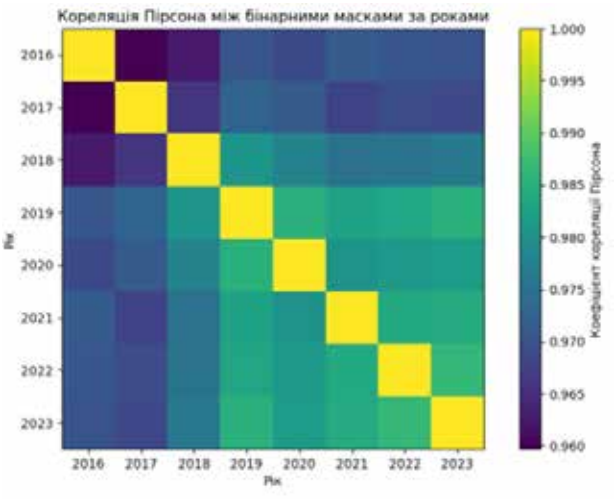


Рис. 7. Графік значень коефіцієнта Пірсона за роками

на позитивні зміни у водних об’єктах. Аналізуючи графік, можна визначити тенденцію зміни площі водного дзеркала, що вказує на тенденцію до втрати прибережних територій (обмілiння) з часом.

На наступному етапі було створено векторний шар отриманих контурів водних об’єктів на супутниковому знімку Sentinel-2 за період 2016-2023 р. (рис. 9). Візуально можна спостерігати за втратами прибережних територій (обмілiння) протягом семи років. Візуально проведений аналіз (рис. 9) водних об’єктів дозволяє виявити території, де відбувається осушення лиманів. Такими областями є озеро-лиман Солоне та озеро-лиман Хаджидер.

Значення коефіцієнтів відбиття світла від поверхні води та суші у 2023 році наведено на рис. 10. Коефіцієнт відбиття вказує на те, який

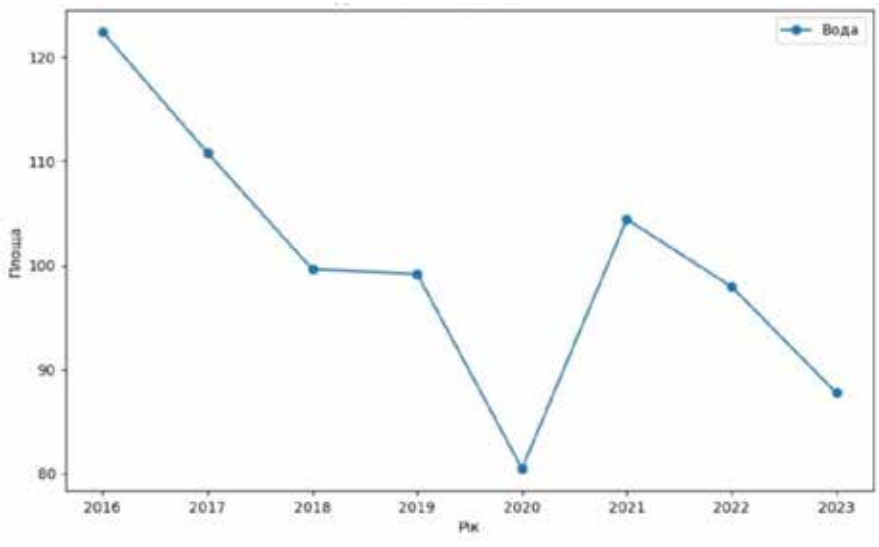


Рис. 8. Графік зміни площі водного дзеркала Тузлівських лиманів

Рис. 9. Картографування зміни площі водного дзеркала Тузлівських лиманів з 2016 рік по 2023 рік

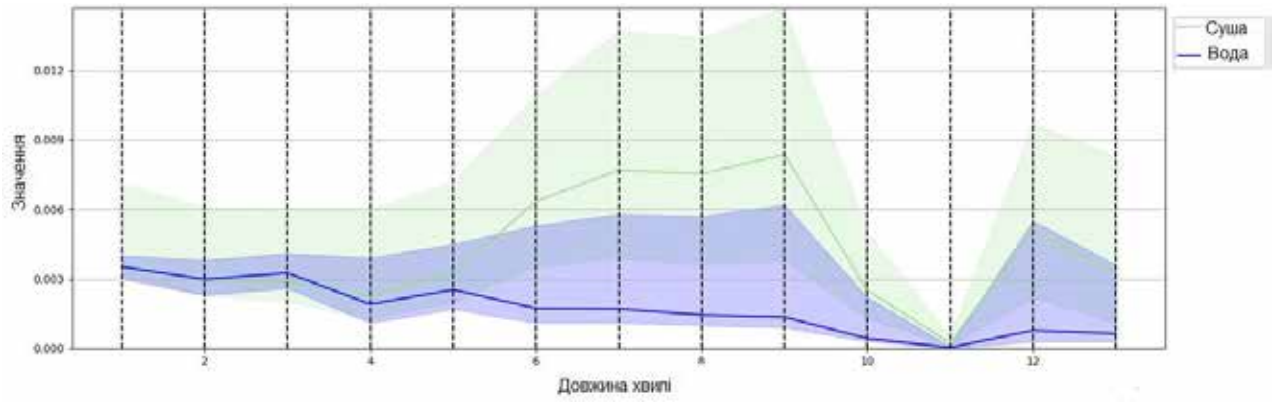


Рис. 10. Коефіцієнти відбиття водної поверхні та суші

відсоток світла падає на поверхню, відбивається від неї. Зміна цих коефіцієнтів пов'язана з різницею в фізичних властивостях води та суші, таких як структура поверхні, прозорість, вологість і т.д.

В даному дослідженні було побудовано та проаналізовано графік значень коефіцієнтів відбиття прибережної зони в інфрачервоному (ІЧ) каналі за період 2016–2023 роки (рис. 11). Зміни в значеннях коефіцієнтів відбиття в ІЧ-каналі свідчать про різниці в температурі та тепловіддачі прибережної зони. Це може бути пов'язано з такими факторами, як зміни клімату, розширення або зменшення водних об'єктів, або інші природні та антропогенні впливи.

У таблиці 1 представлено результати метрик OA та Kappa для запропонованої технології та індексів NDWI, MNDWI, K-means. У 2016 році запропонована технологія виділяє водні об'єкти з точністю 97% та коефіцієнтом Каппа– 0.94. Порівняно з цим, інші методи, такі як NDWI, MNDWI та K-means, мають нижчі показники ефективності. Для зображення 2023 р. запропонована технологія знову показує високу точність – 96.96%, а Каппа залишається стабільно високою на рівні 0.94. При цьому NDWI має точність 77.08% та Каппа 0.56, MNDWI демонструє точність 93.46% та Каппа 0.86, а K-means – точність 95.36% та Каппа 0.92.

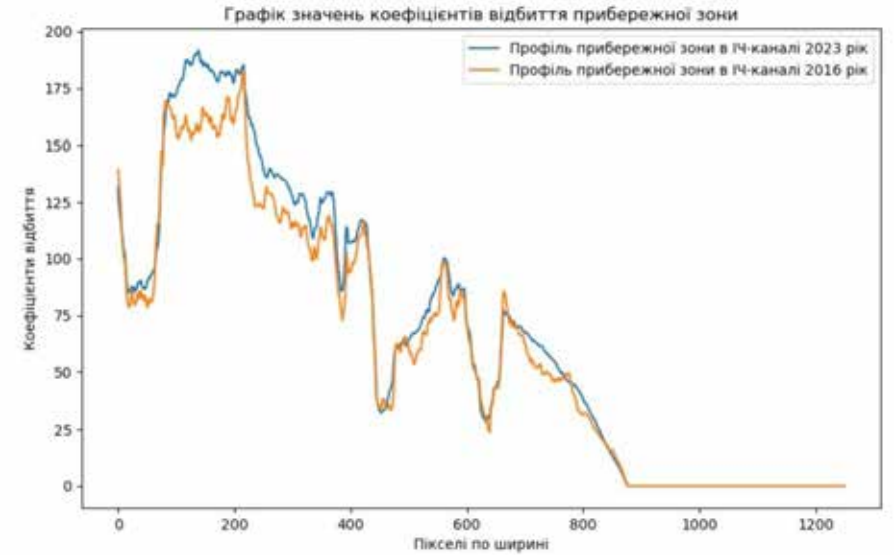


Рис. 11. Графік коефіцієнтів відбиття прибережної зони в ІЧ-каналі

Таблиця 1

Результати оцінки точності картографування водних об'єктів

Метод	2016 рік		2023 рік	
	OA	Kappa	OA	Kappa
NDWI	83%	0.67	77%	0.56
MNDWI	91%	0.82	93%	0.86
K-means	94%	0.90	95%	0.90
Запропонована технологія	97%	0.94	97%	0.94

Отримані результати свідчать про високу точність запропонованої інформаційної технології у порівнянні з існуючими методами, підкреслюючи її ефективність для розпізнавання та моніторингу водних об'єктів на основі супутникових зображень.

Висновки. Автоматизовані та точні карти поверхневих вод з використанням супутникових зображень стають невід'ємною складовою для досліджень та прийняття рішень в області міських екосистем. Ці карти дозволяють проводити моніторинг впливу міських факторів, таких як теплові острови та адаптація до зміни клімату. У цій роботі представлено технологію розпізнавання та моніторингу водних об'єктів на цифрових оптичних супутникових зображеннях з використанням машинного навчання. Запропонований підхід дозволяє отримати результати з субпіксельною точністю для подальших досліджень та прийняття рішень. Здійснено порівняльний аналіз з альтернативними методами, такими як водні індекси та K-means, який підтверджує високу точність (97%) та стабільність розробленої технології. Коефіцієнт Каппа, який враховує ступінь узгодженості між реальною та передбачуваною класифікацією, підтверджує високу стабільність та достовірність підходу (0.94 для обох років). Додаткові дослідження на сезонність та стійкість у вилученні та картографуванні водних поверхонь залишаються об'єктом майбутніх досліджень.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Chatufale, Aditya P., Priti, P. Rege, and Abhishek Bhatt. Extraction of waterbody using object-based image analysis and XGBoost. Advanced Machine Intelligence and Signal Processing. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. 341-350.

2. Chen, Y., Fan, R., Bilal, M., Yang, X., Wang, J., Li, W. Multilevel Cloud Detection for High-Resolution Remote Sensing Imagery Using Multiple Convolutional Neural Networks. ISPRS Int. J. Geo-Inf., 7, 2018. 181.

3. Désirée, Ruppen, James, Runnalls, Raphael, M., Tshimanga, Bernhard, Wehrli, Daniel, Odermatt. Optical remote sensing of large-scale water pollution in Angola and DR Congo caused by the Catoca mine tailings spill. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2023. 118.

4. Feng, W., Sui, H., Huang, W., Xu, C. and An, K. Water Body Extraction From Very High-Resolution Remote Sensing Imagery Using Deep U-Net and a Superpixel-Based Conditional Random Field Model. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019. 16(4), 618-622.

5. Fisher, A., Flood, N., Danaher, T. Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia. Remote Sens. Environ, 2016. 175, 167–182.

6. Jiang, W., He, G., Long, T., Ni, Y., Liu, H., Peng, Y., Lv, K., Wang G. Multilayer Perceptron Neural Network for Surface Water Extraction in Landsat 8 OLI Satellite Images. Remote Sens, 2018. 10, 755.

7. Li, W, Qin, Y, Sun, Y, Huang H, Ling F, Tian L, Ding Y. Estimating the relationship between dam water level and surface water area for the Danjiangkou Reservoir using Landsat remote sensing images. Remote Sens Lett, 2016. 7(2), 121–130.

8. Liu, Qihang, et al. Probabilistic river water mapping from Landsat-8 using the support vector machine method. Remote Sensing, 2020. 12(9), 1374.

9. Mao, Taomin, Yewen, Fan, Shuang Zhi, and Jinshan, Tang. A Morphological Feature-Oriented Algorithm for Extracting Impervious Surface Areas Obscured by Vegetation in Collaboration with OSM Road Networks in Urban Areas. Remote Sensing, 2022. 10(14), 2493.

10. Nardini, A.G.C., Salas, F., Carrasco, Z., Valenzuela, N., Rojas, R., Vargas-Baecheler, J., Yépez S. Automatic River Planform Recognition Tested on Chilean Rivers. Water, 2023. 15, 2359.

11. Palomar-Vázquez, Jesús, Josep E., Pardo-Pascual, Jaime, Almonacid-Caballer, and Carlos, Cabezas-Rabadán. Shoreline Analysis and Extraction Tool (SAET): A New Tool for the Automatic Extraction of Satellite-Derived Shorelines with Subpixel Accuracy. Remote Sensing, 2023. (15), 3198.

12. Vapnik V. Cham. The Nature of Statistical Learning Theory. Springer Science & Business Media. 2013.

13. Wangchuk, Sonam, and Tobias, Bolch. Mapping of glacial lakes using Sentinel-1 and Sentinel-2 data and a random forest classifier: Strengths and challenges. Science of Remote Sensing, 2020. 2, 100008.

14. Xiang, X., Li, Q., Khan, S., & Khalaf, O. I. Urban Water Resource Management for Sustainable Environment Planning Using Artificial Intelligence Techniques. Environmental Impact Assessment Review, 2021. (86), 106515.

15. Xie, H, Luo, X, Xu, X, Pan, H, Tong, X. Automated Subpixel Surface Water Mapping from Heterogeneous Urban Environments Using Landsat 8 OLI Imagery. Remote Sensing, 2016. 87, 584.

16. Xie, H., Luo, X., Xu, X., Pan, H., Tong, X. Automated Subpixel Surface Water Mapping from Heterogeneous Urban Environments Using Landsat 8 OLI Imagery. Remote Sens, 2016. 8.

17. Yang, X., Zhao, S., Qin, X., Zhao, N., Liang, L. Mapping of Urban Surface Water Bodies from Sentinel-2 MSI Imagery at 10 m Resolution via NDWI-Based Image Sharpening. Remote Sens, 2017. 9, 596.

18. Zhou, Y., Dong, J., Xiao, X., Xiao, T., Yang, Z., Zhao, G., Zou, Z., Qin, Y. Open Surface Water Mapping Algorithms: A Comparison of Water-Related Spectral Indices and Sensors. Water, 2017. 7.

REFERENCES:

1. Chatufale, Aditya P., Priti, P. Rege, and Abhishek Bhatt. (2022). Extraction of waterbody using object-based image analysis and XGBoost. Advanced Machine Intelligence and Signal Processing. Singapore: Springer Nature Singapore, 341-350.

2. Chen, Y., Fan, R., Bilal, M., Yang, X., Wang, J., Li, W. (2018). Multilevel Cloud Detection for High-Resolution Remote Sensing Imagery Using Multiple Convolutional Neural Networks. ISPRS Int. J. Geo-Inf., 7, 181.

3. Désirée, Ruppen, James, Runnalls, Raphael, M., Tshimanga, Bernhard, Wehrli, Daniel, Odermatt. (2023). Optical remote sensing of large-scale water pollution in Angola and DR Congo caused by the Catoca mine tailings spill. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 118.

4. Feng, W., Sui, H., Huang, W., Xu, C. and An, K. (2019). Water Body Extraction From Very High-Resolution Remote Sensing Imagery Using Deep U-Net and a Superpixel-Based Conditional Random Field Model. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 16(4), 618-622.

5. Fisher, A., Flood, N., Danaher, T. (2016). Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia. Remote Sens. Environ, 175, 167–182.

6. Jiang, W., He, G., Long, T., Ni, Y., Liu, H., Peng, Y., Lv, K., Wang G. (2018). Multilayer Perceptron Neural Network for Surface Water Extraction in Landsat 8 OLI Satellite Images. Remote Sens, 10, 755.

7. Li, W, Qin, Y, Sun, Y, Huang H, Ling F, Tian L, Ding Y. (2016). Estimating the relationship between dam water level and surface water area for the Danjiangkou Reservoir using Landsat remote sensing images. Remote Sens Lett, 7(2), 121–130.

8. Liu, Qihang, et al. (2020). Probabilistic river water mapping from Landsat-8 using the support vector machine method. Remote Sensing, 12(9), 1374.

9. Mao, Taomin, Yewen, Fan, Shuang Zhi, and Jinshan, Tang. (2022). A Morphological Feature-Oriented Algorithm for Extracting Impervious Surface Areas Obscured by Vegetation in Collaboration with OSM Road Networks in Urban Areas. Remote Sensing, 10(14), 2493.

10. Nardini, A.G.C., Salas, F., Carrasco, Z., Valenzuela, N., Rojas, R., Vargas-Baecheler, J., Yépez S. (2023). Automatic River Planform Recognition Tested on Chilean Rivers. Water, 15, 2359.

11. Palomar-Vázquez, Jesús, Josep E., Pardo-Pascual, Jaime, Almonacid-Caballer, and Carlos, Cabezas-Rabadán. (2023). Shoreline Analysis and Extraction Tool (SAET): A New Tool for the Automatic Extraction of Satellite-Derived Shorelines with Subpixel Accuracy. Remote Sensing, (15), 3198.

12. Vapnik V. Cham. (2013). The Nature of Statistical Learning Theory. Springer Science & Business Media.

13. Wangchuk, Sonam, and Tobias, Bolch. (2020). Mapping of glacial lakes using Sentinel-1 and Sentinel-2 data and a random forest classifier: Strengths and challenges. Science of Remote Sensing, 2, 100008.

14. Xiang, X., Li, Q., Khan, S., & Khalaf, O. I. (2021). Urban Water Resource Management for Sustainable Environment Planning Using Artificial Intelligence Techniques. Environmental Impact Assessment Review, (86), 106515.

15. Xie, H, Luo, X, Xu, X, Pan, H, Tong, X. (2016). Automated Subpixel Surface Water Mapping from Heterogeneous Urban Environments Using Landsat 8 OLI Imagery. Remote Sensing, 87, 584.

16. Xie, H., Luo, X., Xu, X., Pan, H., Tong, X. (2016). Automated Subpixel Surface Water Mapping from Heterogeneous Urban Environments Using Landsat 8 OLI Imagery. Remote Sens, 8.

17. Yang, X., Zhao, S., Qin, X., Zhao, N., Liang, L. (2017). Mapping of Urban Surface Water Bodies from Sentinel-2 MSI Imagery at 10 m Resolution via NDWI-Based Image Sharpening. Remote Sens, 9, 596.

18. Zhou, Y., Dong, J., Xiao, X., Xiao, T., Yang, Z., Zhao, G., Zou, Z., Qin, Y. (2017). Open Surface Water Mapping Algorithms: A Comparison of Water-Related Spectral Indices and Sensors. Water, 7.

UDC 517.9
DOI https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-5

Valeriy MAGRO
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor at the Department of Information Security and Telecommunications, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho ave., Dnipro, Ukraine, 49005, magrov@i.ua
ORCID: *0000-0003-4238-6733*
Scopus Author ID: *6602911357*

Valentyn MOROZOV
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Telecommunication Systems and Networks, Oles Honchar Dnipro National University, 72 Gagarina ave., Dnipro, Ukraine, 49050, morozovvmd@gmail.com
ORCID: *0000-0002-9706-7898*
Scopus Author ID: *8224597800*

To cite this article: Magro, V., Morozov, V. (2023). Elektrodynamichnyi alhorytm rozrakhunku antennoi reshitky na osnovi intehralnoho predstavlennia dlia polia spilnoi oblasti [Electrodynamic algorithm for calculating an antenna array based on an integral representation for a common region field]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 3, 43–49, doi: https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-5

ELECTRODYNAMIC ALGORITHM FOR CALCULATING AN ANTENNA ARRAY BASED ON AN INTEGRAL REPRESENTATION FOR A COMMON REGION FIELD

The article is devoted to the study of a new approach in the integral equation method. The solution of the electrodynamic problem is carried out based on conditional selection of the common region in the entire area of electromagnetic field definition. In our previous publications, we proposed an integral equation method based on the selection of a penetrating region for solving the problem of electromagnetic wave diffraction on a periodic structure. The legality of using the proposed approach and its equivalence with the previously proposed approach are shown.

In this article, the calculation of an infinite antenna array scanning in the H-plane is carried out. The numerical convergence of the proposed approach for reflection coefficients R_{10} with increasing order of truncation of the system of linear algebraic equations was studied. It was found that the modulus of the reflection coefficient coincides with the exact solution at $M = 1$ and subsequently does not change with the growth of M. While the phase of the reflection coefficient changes with the growth of M and when $M > 11$, the difference between the phase value of the exact solution and the calculated value is less than 1%. That is, for the case of scanning in the H-plane, good convergence of the problem solution was obtained for all scanning angles.

The aim of the work *is to show that for a certain class of problems of applied electrodynamics, it is possible to apply the integral equation method based on the selection of a common region.*

The methodology *consists in the conditional allocation of a common region in the entire area of electromagnetic field determination and the application of the integral equation method.*

The scientific novelty *is that we have shown the correctness of using a new approach based on the selection of the field of the common region for the calculation of periodic structures in the H-plane.*

The conclusions *can be formulated as follows. It is shown that two approaches can be used to calculate the antenna array in the H-plane: the first based on the selection of the integral representation for the full field of the penetrating region, the second based on the selection of the integral representation for the full field of the common region.*

Key words: *integral equation method, penetrating domain, common region, reflection coefficient, numerical convergence.*

Валерій МАГРО
кандидат фізико-математичних наук, професор кафедри захисту інформації та телекомунікацій, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», проспект Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005, magrov@i.ua
ORCID: *0000-0003-4238-6733*
Scopus Author ID: *6602911357*

Валентин МОРОЗОВ
кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри телекомунікаційних систем і мереж, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, проспект Гагаріна, 72, м. Дніпро, Україна, 49050, morozovvmd@gmail.com
***ORCID:** 0000-0002-9706-7898*
***Scopus Author ID:** 8224597800*

Бібліографічний опис статті: Магро, В., Морозов, В. Електродинамічний алгоритм розрахунку антенної решітки на основі інтегрального представлення для поля спільної області. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 3, 43–49, doi: https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-5

ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИЙ АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ НА ОСНОВІ ІНТЕГРАЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕННЯ ДЛЯ ПОЛЯ СПІЛЬНОЇ ОБЛАСТІ

Статтю присвячено дослідженню нового підходу в методі інтегрального рівняння. Розв'язок електродинамічної задачі проводиться на основі умовного виділення спільної області у всій області визначення електромагнітного поля. В наших попередніх публікаціях пропонувався метод інтегрального рівняння на основі виділення проникливої області для розв'язку задачі дифракції електромагнітної хвилі на періодичній структурі. Показана правомірність застосування запропонованого підходу і його еквівалентність із раніш запропонованим підходом.

В даній статті проведено розрахунок нескінченої антенної решітки, що сканує в H-площині. Досліджена чисельна збіжність запропонованого підходу для коефіцієнтів відбиття R_{10} при збільшенні поряду усічення системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Отримано, що модуль коефіцієнта відбиття співпадає із точним рішенням при $M = 1$ і в подальшому не змінюється з ростом M. В той час як фаза коефіцієнта відбиття змінюється з ростом M і при $M > 11$ різниця між величиною фази точного рішення та обчислювальної величини складає менше 1%. Тобто, для випадку сканування в H-площині для всіх кутів сканування отримана гарна збіжність рішення задачі.

Мета роботи *– показати, що для певного класу задач прикладної електродинаміки можна застосовувати метод інтегрального рівняння на основі виділення спільної області.*

Методологія *полягає в умовному виділенні спільної області у всій області визначення електромагнітного поля і застосуванні метода інтегрального рівняння.*

Наукова новизна *полягає в тому, що ми показали коректність застосування нового підходу на основі виділення поля спільної області для розрахунків періодичних структур в H-площині.*

Висновки *можна сформулювати таким чином. Показано, що для розрахунку антенної решітки в H-площині можна використовувати два підходи: перший на основі виділення інтегрального представлення для повного поля проникливої області, другий на основі виділення інтегрального представлення для повного поля спільної області.*

Ключові слова: *метод інтегрального рівняння, проникливa область, спільна область, коефіцієнт відбиття, чисельна збіжність.*

Introduction. Nowadays, in the field of wireless communications, there is a rapid transition to a higher frequency range of microwaves. Development of a new frequency range requires the creation of new emitting devices. One of the types of modern devices is MASSIVE MIMO and Intelligent Reflecting Surface. The creation of such devices takes place through mathematical modeling. Therefore, there is a need to improve the methods used in mathematical modeling, particularly the integral equation method.

Currently, interest remains in improving the integral equation method for its application to the calculation of various radiating structures (Li X. at al, 2018; Li H. at al, 2018; Morozov, Magro, 2020; Morozov, Magro, 2021). Although the mode matching method can be considered «classical», it is constantly developing and improving depending on the type of devices for which mathematical modeling is performed (Morozov, Magro, 2020; Zheng, Yu, 2007). The emergence of new complex emitting devices leads to the need to consider the value of the dielectric constant of materials located in the aperture of the emitter. Therefore, there are various improvements in the integral equation method (Gnilenko, Magro, 2017; Sun, Zhao, Huang, 2019; Bie, Peng, Jiang, 2021; Magro, Morozov, 2022).

The purpose of the work is to show that for a certain class of problems of applied electrodynamics it is possible to apply the integral equation method based on the selection of a common region. In our previous works, we proposed a new approach in the integral equation method (Magro, Morozov, 2000). It is based on the conditional selection of a penetrating region on the entire electromagnetic field definition area. In this work, an approach in

the integral equation method is proposed, which is based on the conditional allocation of a common area in the entire area of electromagnetic field determination.

Electrodynamic algorithm based on an integral representation for a general area field.

Let us consider the infinite a waveguide antenna array consisting of open ends of a waveguide. The antenna array is surrounded by an endless metal screen. In an infinite antenna array, the fields are identical in all periodic cells, except for the phase value, which changes by a constant value in each subsequent element. Therefore, we will consider the field only in one cell, which is located at the origin of coordinates. The cross section of an infinite antenna array of plane-parallel waveguides for the case of scanning in the H-plane (the electric field strength vector is directed along the OY axis), Fig. 1. We conditionally divide the domain of definition of the electromagnetic field into three overlapping regions: 1 is waveguide region extended to infinity $-w/2 \le x \le w/2;\ -\infty \le z \le \infty$; 2 is half-space above a metal screen $-F/2 \le x \le F/2;\ 0 \le z \le \infty$; C is common region $-w/2 \le x \le w/2;\ 0 \le z \le \infty$.

In the common region, at points $(-w/2, 0);\ (w/2)$ the field $E_y^0(x,0) = 0$ is equal to zero, therefore the Green's function of this region will be equal to zero at other points $G^0(x,0;x',z') = 0$. Then we can write the following integral representation

$$E_y^0(x,z) = \int_0^\infty \left[E_y^0(-w/2,z') \frac{\partial G^0(x,z;x',z')}{\partial x'}\bigg|_{\substack{x'=-w/2 \\ z \prec z'}} - E_y^0(w/2,z') \frac{\partial G^0(x,z;x',z')}{\partial x'}\bigg|_{\substack{x'=w/2 \\ z \prec z'}} \right] dz' + \int_{-w/2}^{w/2} E_y^0(x',0) \frac{\partial G^0(x,z;x',z')}{\partial z'}\bigg|_{\substack{z'=0 \\ z \succ z'}} dx', \quad (1)$$

$$x, x' \in [-w/2, w/2];\ z' \in [0,\infty];\ z = 0.$$

Here G^0 is the Green's function of the common region, which has the following form:

$$G^0(x,z;x',z') = \sum_{q=1}^{\infty} D_q(x) D_q(x') \frac{1}{jwl_q} \begin{cases} e^{-jwl_q z} sh(jwl_q z'), & z \succ z'; \\ e^{-jwl_q z'} sh(jwl_q z), & z \prec z'. \end{cases} \quad (2)$$

We use the following boundary condition:

$$E_y^2(x,z) = E_y^0(x,z), \quad z = 0. \quad (3)$$

Considering these boundary conditions, the Green's function of the common region will take the following values:

$$G^0(x,0;x',z')\big|_{z \prec z'} = 0; \quad \frac{\partial G^0(x,0;x',z')}{\partial x'}\bigg|_{x'=\pm w/2} = 0. \quad (4)$$

Considering equations (3) and (4), equation (1) can be rewritten in the following form:

$$E_y^2(x,0) = \int_{-w/2}^{w/2} E_y^1(x',0) \frac{\partial G^0(x,z;x',z')}{\partial z'}\bigg|_{\substack{z'=0 \\ z \succ z'}} dx'. \quad (5)$$

We use the following boundary conditions:

$$H_x^1(x,z) = H_x^0(x,z),\ z = 0;$$

$$\frac{\partial E_y^1(x,z)}{\partial z}\bigg|_{z=0} = \frac{\partial E_y^0(x,z)}{\partial z}\bigg|_{z=0}. \quad (6)$$

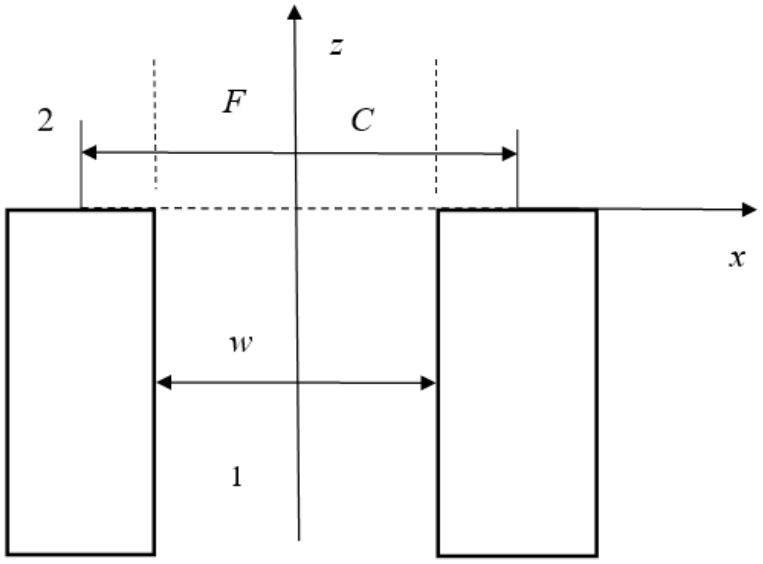


Fig. 1. Single antenna array cell with dedicated areas

Considering boundary conditions (6), equation (1) takes the form:

$$\left.\frac{\partial E_y^1(x,z)}{\partial z}\right|_{z=0^-} = \left.\frac{\partial}{\partial z}\right|_{z=0^-} \int_0^{\infty} (E_y^2(-w/2,z') \left.\frac{\partial G^0(x,z;x',z')}{\partial x'}\right|_{\substack{x'=-w/2 \\ z<z' \\ z=0^-}} -$$

$$- E_y^2(w/2,z') \left.\frac{\partial G^0(x,z;x',z')}{\partial x'}\right|_{\substack{x'=w/2 \\ z<z' \\ z=0^-}}) dz' +$$

$$+ \left.\frac{\partial}{\partial z}\right|_{z=0^+} \int_{-w/2}^{w/2} E_y^1(x',0) \left.\frac{\partial G^0(x,z;x',z')}{\partial z'}\right|_{\substack{z'=0 \\ z>z' \\ z=0^+}} dx', \qquad (7)$$

$$z = \begin{cases} 0^-, z' \in [0,\infty]; \\ 0^+, z' = 0. \end{cases}$$

Thus, in equation (7), when differentiating both integrals, the source (integration) points and the observation points do not coincide. That is, the integrand function has no singularities. Therefore, it is possible to introduce differentiation operations under the signs of integrals. As a result, we obtain the following system of equations:

$$E_y^2(x,0) = \int_{-w/2}^{w/2} E_y^1(x',0) \left.\frac{\partial G^0(x,z;x',z')}{\partial z'}\right|_{\substack{z'=0 \\ z>z' \\ z=0}} dx';$$

$$\left.\frac{\partial E_y^1(x,z)}{\partial z}\right|_{z=0} = \int_0^{\infty} \left[E_y^2(-w/2,z') \left.\frac{\partial^2 G^0(x,z;x',z')}{\partial z \partial x'}\right|_{\substack{x'=-w/2 \\ z<z' \\ z=0}} - \right.$$

$$\left. - E_y^2(w/2,z') \left.\frac{\partial^2 G^0(x,z;x',z')}{\partial z \partial x'}\right|_{\substack{x'=w/2 \\ z<z' \\ z=0}} \right] dz' +$$

$$+ \int_{-w/2}^{w/2} E_y^1(x',0) \left.\frac{\partial^2 G^0(x,z;x',z')}{\partial z \partial z'}\right|_{\substack{z'=0 \\ z>z' \\ z=0}} dx'. \qquad (8)$$

Let us represent the fields in the first and second regions in the form of a Fourier series expansion (Amitay, Galindo, Wu, 1972):

$$E_y^1(x,z) = \sum_{n=1}^{\infty} R_n D_n(x) e^{j w l_n z} + E_{y\,exc}^1(x,z); \qquad (9)$$

$$E_y^2(x,z) = \sum_{n=1}^{\infty} T_m f_m(x) e^{-j \gamma l_n z}, \qquad (10)$$

here $f_m(x)$ is complex orthonormal system of transverse eigenfunctions of radiation space (Amitay, Galindo, Wu, 1972).

Let us substitute expressions (2), (9), (10) into the first equation of system (8). Then we have:

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} T_m f_m(x) = \sum_{n=1}^{\infty}\sum_{q=1}^{\infty} R_n D_q(x) \int_{-w/2}^{w/2} D_n(x') D_q(x') dx' +$$

$$+ \sum_{q=1}^{\infty} D_q(x) \int_{-w/2}^{w/2} D_1(x') D_q(x') dx'.$$

As a result, we get the expression:

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} T_m f_m(x) = \sum_{n=1}^{\infty} R_n D_n(x) + D_1(x); \; x \in [-w/2, w/2]. \qquad (11)$$

Equation (11) is equivalent to the usual «mode-matching method». Let's multiply the left and right sides of equation (11) by $D_v(x)$ and integrate within $[-w/2, w/2]$.

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} T_m \int_{-w/2}^{w/2} f_m(x) D_v(x) dx =$$

$$= \sum_{n=1}^{\infty} R_n \int_{-w/2}^{w/2} D_n(x) D_v(x) dx + \int_{-w/2}^{w/2} D_1(x) D_v(x); \qquad (12)$$

$$R_v + \sum_{m=-\infty}^{\infty} T_m (-C_{vm}) = \delta_{1v}.$$

Let us substitute expressions (2), (9), (10) into the second equation of system (8). Then we have the following expression

$$\sum_{n=1}^{\infty} R_n \, j w l_n D_n(x) - j w l_1 D_1(x) =$$

$$= \sum_{m=-\infty}^{\infty}\sum_{q=1}^{\infty} T_m \left[f_m(-w/2) \left.\frac{dD_q(x')}{dx'}\right|_{x'=-w/2} - f_m(w/2) \left.\frac{dD_q(x')}{dx'}\right|_{x'=w/2} \right].$$

$$D_v(x) \int_0^{\infty} e^{-j(\gamma l_m + w l_q) z'} +$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty}\sum_{q=1}^{\infty} R_n (-j) w l_q D_q(x) \int_{-w/2}^{w/2} D_n(x') D_q(x') dx' +$$

$$+ \sum_{q=1}^{\infty} (-j) w l_q D_q(x) \int_{-w/2}^{w/2} D_1(x') D_q(x') dx'.$$

After transformations we obtain the following equation

$$\sum_{n=1}^{\infty} R_n \, j w l_n D_n(x) = \sum_{m=-\infty}^{\infty}\sum_{q=1}^{\infty} T_m A_{qm}^{"} B_{qm} D_q(x) +$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} R_n (-j) w l_n D_n(x). \qquad (13)$$

Let's multiply the left and right sides of equation (13) by $D_v(x)$ and integrate within $[-w/2, w/2]$

$$\sum_{n=1}^{\infty} R_n \, j w l_n \int_{-w/2}^{w/2} D_n(x) D_v(x) dx =$$

$$= \sum_{m=-\infty}^{\infty}\sum_{q=1}^{\infty} T_m A_{qm}^{"} B_{qm} \int_{-w/2}^{w/2} D_q(x) D_v(x) dx +$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} R_n (-j) w l_n \int_{-w/2}^{w/2} D_n(x) D_v(x) dx.$$

As a result, we get the following equation:

$$-2 \, j w l_v R_v + \sum_{=-\infty}^{\infty} T_m A_{qm}^{"} B_{vm} = 0. \qquad (14)$$

Thus, equations (13) and (14) form the following system of equations:

$$-2\,j\,wl_v\,R_v + \sum_{=-\infty}^{\infty} T_m\,A''_{qm}\,B_{vm} = 0\,; \qquad (15)$$

$$R_v + \sum_{m=-\infty}^{\infty} T_m\,(-C_{vm}) = \delta_{1v}\,.$$

Let us exclude the unknown coefficient R_v from system (15)

$$R_v = \sum_{m=-\infty}^{\infty} T_m\,C_{vm} - \delta_{1v}\,; \qquad (16)$$

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} (C_{vm}\,2\,j\,wl_v - A''_{vm}\,B_{vm})\,T_m = 2\,j\,wl_m\,\delta_{1v}\,.$$

Let's multiply equation (16) by $(\frac{-1}{2\,j\,wl_v})$ and consider that A_{vm} has the following form:

$$A_{vm} = \frac{1}{2\,j\,wl_v} A''_{vm}\,.$$

We finally get the following expression:

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} (C_{vm} - A_{vm}\,B_{vm})\,T_m = \delta_{1v}. \qquad (17)$$

The resulting system of equations (17) is equivalent to the system of equations obtained by the penetrating domain method (Morozov, Magro, 2000).

As a test to verify the correctness of the proposed algorithm, we examine a linear antenna array that scans in the H-plane. In table 1 shows the results of a study of the numerical convergence of the solution for the reflection coefficient R_{10} with increasing order of truncation of a system of linear algebraic equations ($F/\lambda = 0.5714$, $t = 0$). In this case, symmetrical truncation was carried out, i.e. the equality $M^+ = M^-$, $M = M^+ + M^- + 1$ was satisfied. The data in Table 1 correspond to the case of waveguides with infinitely thin walls ($t = \frac{F-w}{w} = 0$) and the value $F/\lambda = 0.5714$. Calculations were carried out for scanning angles $\theta = 2.87^0;10^0;40^0;51^0$. It was found that at scanning angles $\theta \le 40^0$, good convergence of the problem solution was obtained. For scanning angles $\theta \ge 51^0$, good convergence is also observed, but it is necessary to consider the larger number $M \ge 31$. Here, the difference between the phase value of the exact solution and the calculated phase value with an error of less than 2% is achieved at $M \ge 31$. Thus, for the case of scanning in the H-plane, good numerical convergence of the solution to the problem was obtained.

Conclusions. An electrodynamic algorithm was built for the first time, which allows for mathematical modeling of a certain class of applied electrodynamics problems. In the work, it is proposed to distinguish a general area from the entire area of electromagnetic field definition. The convergence of the proposed method was studied. It is shown that two approaches can be used to calculate the

Table 1

Investigation of numerical convergence of the solution for different scanning angles (Magro, Morozov, 2023)

M	$\lvert R_{10}\rvert$	**phase, deg.**	$\lvert R_{10}\rvert$	**phase, deg.**
	$\theta = 2.87^0$		$\theta = 40^0$	
1	0.347	180.0	0.226	180.0
3	0.347	165.2	0.226	123.7
5	0.347	161.7	0.226	118.8
7	0.347	160.1	0.226	116.9
9	0.347	159.2	0.226	115.9
11	0.347	158.6	0.226	115.2
13	0.347	158.2	0.226	114.8
15	0.347	157.9	0.226	114.4
17	0.347	157.7	0.226	114.2
19	0.347	157.5	0.226	114.0
21	0.347	157.4	0.226	113.8
	$\theta = 10^0$		$\theta = 51^0$	
1	0.341	180.0	0.130	180.0
3	0.341	163.7	0.046	36.2
5	0.341	160.1	0.460	30.2
7	0.341	158.5	0.460	28.6
9	0.341	157.6	0.460	27.5
11	0.341	157.0	0.460	26.8
13	0.341	156.6	0.460	26.4
15	0.341	156.3	0.460	26.0
17	0.341	156.1	0.460	25.8
19	0.341	155.9	0.460	25.6
21	0.341	155.7	0.460	25.4

antenna array in the H-plane: the first based on the selection of the integral representation for the full field of the penetrating region, the second based on the selection of the integral representation for the full field of the general region. The proposed approach in the integral equation method allows to solve the radiation problems of modern antenna arrays.

BIBLIOGRAPHY:

1. Li X., Lei L., Chen Y., Jiang M., Hu J. A domain decomposition method based on volume-surface integral equation for complex dielectric/metallic composite objects. *Proceeding of the IEEE 12th International symposium on antennas, propagation and EM theory (ISAPE).* 2018. P. 1-3. doi: 10.1109/ISAPE.2018.8634188

2. Li H., Zhang H.-X., Zhou L., Yin W.-Y., Huang Z., Liao Y. Discontinuous Galerkin time domain electric field integral equation method for solving non-conformal structures *Proceeding of the IEEE International symposium on antennas and propagation & USNC/URSI National radio science meeting*. 2018. P.2445-2446. doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8609060

3. Morozov V.M., Magro V.I. Application of the method of integral equation for calculating a step-transition in a coaxial waveguide. *Journal of Physics and Electronics.* 2020. – Vol. 28, No. 1. P.69-76. doi: 10.15421/332012

4. Morozov V.M., Magro V.I. Calculation of a non-reflective connection in a coaxial line. *Journal of Physics and Electronics*. 2021. Vol. 29, No. 1. P.99-104. doi: 10.15421/332016

5. Zheng J., Yu M. Rigorous mode matching method for circular to off-centre-rectangular side-coupled waveguide junctions. *Proceeding of the 2007 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium.* 2007. P. 1923-1926. doi: 10.1109/MWSYM.2007.380186

6. Gnilenko A.B., Magro V.I. Method of overlapping regions for solving electromagnetic problems. *Proceeding of XXII[nd] International seminar/workshop on direct and inverse problems of electromagnetic and acoustic wave theory*. 2017. P.36-41. doi: 10.1109/DIPED.2017.8100554

7. Sun C., Zhao J., Huang W. New insight into complex mode matching method for modeling and simulation of surface-emitting grating couplers. *Journal of Lightwave Technology.* 2019. Vol.37, No. 3. P 838-844. doi: 10.1109/JLT.2018.2881746

8. Bie M., Peng M., Jiang Z. H. A mode matching method for efficient evaluation of short backfire antennas loaded with anisotropic impedance surfaces. *Proceeding of the IEEE International applied computational electromagnetics society symposium*. 2021. P. 1-2. doi 10.23919/ACES-China52398.2021.9581828

9. Magro V.I., Morozov V.M. Study of a finite linear waveguide antenna array with dielectric plugs. *Journal of Physics and Electronics.* 2022. Vol. 30, No. 2. P.75-80. doi: 10.15421/332223

10. Морозов В.М., Магро В.И. Метод интегрального уравнения на основе выделения пронизывающей области. *Вісті вищих учбових закладів. Радіоелектроніка.* 2000. № 1. С. 28-33. doi: 10.20535/s0021347000010039

11. Amitay N., Galindo V., Wu C. Theory and analysis of phased array antennas. New York: Wiley-Interscience, 1972. 462 p.

REFERENCES:

1. Li X., Lei L., Chen Y., Jiang M., Hu J. (2018). A domain decomposition method based on volume-surface integral equation for complex dielectric/metallic composite objects. *Proceeding of the IEEE 12th International symposium on antennas, propagation and EM theory (ISAPE).* P. 1-3. doi: 10.1109/ISAPE.2018.8634188

2. Li H., Zhang H.-X., Zhou L., Yin W.-Y., Huang Z., Liao Y. (2018). Discontinuous Galerkin time domain electric field integral equation method for solving non-conformal structures *Proceeding of the IEEE International symposium on antennas and propagation & USNC/URSI National radio science meeting*. 2018. P.2445-2446. doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8609060

3. Morozov V.M., Magro V.I. (2020). Application of the method of integral equation for calculating a step-transition in a coaxial waveguide. *Journal of Physics and Electronics.* Vol. 28, No. 1. P.69-76. doi: 10.15421/332012

4. Morozov V.M., Magro V.I. (2021). Calculation of a non-reflective connection in a coaxial line. *Journal of Physics and Electronics*. Vol. 29, No. 1. P.99-104. doi: 10.15421/332016

5. Zheng J., Yu M. (2007). Rigorous mode matching method for circular to off-centre-rectangular side-coupled waveguide junctions. *Proceeding of the 2007 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium.* P. 1923-1926. doi: 10.1109/MWSYM.2007.380186

6. Gnilenko A.B., Magro V.I. (2017). Method of overlapping regions for solving electromagnetic problems. *Proceeding of XXII[nd] International seminar/workshop on direct and inverse problems of electromagnetic and acoustic wave theory*. P.36-41. doi: 10.1109/DIPED.2017.8100554

7. Sun C., Zhao J., Huang W. (2019). New insight into complex mode matching method for modeling and simulation of surface-emitting grating couplers. *Journal of Lightwave Technology.* Vol.37, No. 3. P 838-844. doi: 10.1109/JLT.2018.2881746

8. Bie M., Peng M., Jiang Z. H. (2021). A mode matching method for efficient evaluation of short backfire antennas loaded with anisotropic impedance surfaces. *Proceeding of the IEEE International applied computational electromagnetics society symposium*. P. 1-2. doi 10.23919/ACES-China52398.2021.9581828

9. Magro V.I., Morozov V.M. (2022). Study of a finite linear waveguide antenna array with dielectric plugs. *Journal of Physics and Electronics.* Vol. 30, No. 2. P.75-80. doi: 10.15421/332223

10. Морозов В.М., Магро В.И. (2000). Метод интегрального уравнения на основе выделения пронизывающей области. *Вісті вищих учбових закладів. Радіоелектроніка.* № 1. С. 28-33. doi: 10.20535/s0021347000010039

11. Amitay N., Galindo V., Wu C. (1972). Theory and analysis of phased array antennas. New York: Wiley-Interscience. 462 p.

УДК 004.4
DOI https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-6

Олена МАРЧЕНКО
старший викладач кафедри інформатики та програмної інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056
***ORCID:** 0000-0001-5754-4920*

Бібліографічний опис статті: Марченко, О. (2023). Кібербезпека та захист інформації: аналіз впливу ризиків та загроз із використанням сучасних ефективних стратегій кіберзахисту. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security,* 3, 50–59, doi: https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-6

КІБЕРБЕЗПЕКА ТА ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ: АНАЛІЗ ВПЛИВУ РИЗИКІВ ТА ЗАГРОЗ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ СУЧАСНИХ ЕФЕКТИВНИХ СТРАТЕГІЙ ЗАХИСТУ КІБЕРПРОСТОРУ

Сучасні тенденції розвитку та впровадження захисту від кібернетичних атак відіграють важливе значення у боротьбі проти кіберзлочинців, які завдають великої шкоди для сектора інформаційної безпеки кіберпростору (БКП). Актуальність проведення даного дослідження полягає в тому, що у зв'язку з військовою агресією в Україні кібернетичне середовище та безпека знаходяться у вразливому стані, так як методи та системи БКП постійно вдосконалюються, а разом з ними розвиваються методи вірусного програмного забезпечення для отримання конфіденційної та секретної інформації шляхом завантаження шкідливих компонентів. Найбільш вразливим є сектор критичної інфраструктури, який забезпечує функціонування громадян та країни в цілому надаючи необхідні послуги за допомогою цифрових технологій. З метою виявлення та дослідження загроз БКП проведено аналіз, який складається з методології, опису основних ризиків для запобігання загроз у системі БКП й пошуку ефективних рішень, де надається аналіз використання продуктів антивірусного програмного забезпечення для цифрових систем БКП. Актуальною проблемою даного дослідження є вивчення потенційних загроз та викликів інформаційному простору з проведенням аналізу ефективних рішень для підвищення БКП в Україні. Наукова новизна даного дослідження полягає у пошуку методології, згідно з якою буде можливо провести аналіз виявлення потенційних загроз для БКП. У даній роботі проаналізовані потенційні загрози та виклики для системи БКП, що обґрунтовано наступним: розглянута та проаналізована методологія побудови захисту системи, яка складається з шести основних етапів: моделювання, аналіз, планування, розробка, побудова та експлуатація. На основі проведеного дослідження було проаналізовано 6 різних пакетів антивірусного програмного забезпечення, де результати показали, що антивірус Kaspersky має значну перевагу у використанні на відміну від інших пакетів антивірусних програм. Серед наведених продуктів найкращі показники має Kaspersky, який заблокував 732 файли з рівнем захисту у 100% без виявлення помилок та попереджень, коли продукт Norton має найнижчі показники ефективності.

***Ключові слова:** безпека кіберпростору, інформаційні технології, кібернетичні загрози, кібернетичний захист.*

Olena MARCHENKO
Senior Lecturer of the Department of Computer Science and Software Engineering, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 37 Beresteysky Avenue, Kyiv, 03056
***ORCID:** 0000-0001-5754-4920*

To cite this article: Marchenko, O. (2023). Kiberbezpeka ta zakhyst informatsiyi: analiz vplyvu ryzykiv ta zahroz iz vykorystanniam suchasnykh efektyvnykh stratehiy kiberzakhystu [Cybersecurity and information protection: analysis of the impact of risks and threats using modern effective cyber defence strategies]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security,* 3, 50–59, doi: https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-6

CYBERSECURITY AND INFORMATION PROTECTION: ANALYSIS OF THE IMPACT OF RISKS AND THREATS USING MODERN EFFECTIVE CYBERSPACE PROTECTION STRATEGIES

Modern trends in the development and implementation of protection against cyberattacks are important in the fight against cyber criminals who cause great damage to the cyberspace information security (CSS) sector. The relevance of this study lies in the fact that due to the military aggression in Ukraine, the cyber environment and security are in

a vulnerable state, as the methods and systems of CSS are constantly improving, and along with them, the methods of virus software for obtaining confidential and secret information by downloading malicious components are developing. The most vulnerable sector is the critical infrastructure sector, which ensures the functioning of citizens and the country as a whole by providing essential services through digital technologies. In order to identify and study threats to the CSS, the author conduct an analysis consisting of a methodology, a description of the main risks to prevent threats in the CSS system and the search for effective solutions, where the author analyse the use of antivirus software products for digital CSS systems. The urgent problem of this study is to examine potential threats and challenges to the information space and to analyse effective solutions to improve CSS in Ukraine. The scientific novelty of this study lies in the search for a methodology that, based on the analysis, will allow identifying potential threats to the BCP. This paper analyses the potential threats and challenges to the CSS system, which is substantiated by the following: the methodology for building a system protection, which consists of six main stages: modelling, analysis, planning, development, construction and operation, is considered and analysed. Based on the research, 6 different antivirus software packages were analysed, where the results showed that Kaspersky antivirus has a significant advantage in use in contrast to other antivirus software packages. Among the products, Kaspersky has the best performance, blocking 732 files with a 100% protection level without detecting errors or warnings, while Norton has the lowest performance.

Key words: *cyberspace security, information technology, cyber threats, cyber defence.*

Вступ. Широкі можливості використання кіберпростору та додатків посприяли розвитку інформаційним технологіям (ІТ), однак одночасно з цим виникла вразливість до атак з будь-якої точки світу, що спонукає для розробки та впровадження ефективних технологій захисту від кібератак. Сучасні тенденції з використанням ІТ свідчать про те, що в кіберпросторі спостерігається інтенсивна діяльність, яка може приносити як прибуток одним людям, так і збитки іншим людям (Kafol, 2017, с. 87-90). Використання та зростання соціальних мереж з ресурсами для обміну даних посприяв розвитку онлайн-злочинності та кіберзлочинності, де інформаційна безпека зазнає нових проблем та викликів з питань безпеки кіберпростору (БКП) (Rajasekharaiah, 2020, с. 3-5). Загрози, які існують у кіберпросторі, стає дедалі важче виявляти, а їхнє запобігання вимагає як сучасних знань та обладнання, так і значних фінансових ресурсів. Тому завданням держави є прикладання зусиль (інституційних та фінансових) на заходи з БКП, які спрямовані для боротьби та протистояння з кібератаками (Karpiuk, 2021, с. 235-236).

Зловмисники, які завдають кібератаки на систему ІТ намагаються отримати несанкціонований доступ до апаратної та програмної системи з метою викрадення, змінення та знищення даних. Як зазначено на веб-сайті Microsoft, кібератаки поширюються окремими особами або організаціями з політичними, кримінальними або особистими намірами, щоб отримати або знищити доступ до секретної інформації (Mocean, 2022, с. 26-27). Тому погляди на БКП зазнають сучасних трансформацій, оскільки змінюється тип шкоди завдяки еволюції, де характер шкоди може бути руйнівним від шпигунства та DDoS-так до внесення серйозної фізичної шкоди інфраструктурі та впливу на громадську думку, наприклад втручання у внутрішні справи країни та втручання у державні вибори (Trasuk, 2020, с. 60). Окрім трансформації, неабиякого впливу відіграє адаптація, яка є серйозним викликом як для міжнародної спільноти, так і для кожної держави, для їхніх законодавчих, адміністративних та судових органів з метою досягнення імперативів БКП на користь прав громадян та держави в цілому (Bejan, 2020, с. 5).

Тому сучасні питання БКП стають національно-стратегічною проблемою, яка зачіпає всі сфери життя суспільства й потребує швидкої, ефективної та результативної боротьби з кібернетичними загрозами (КЗ), що вимагає визначення правильних та стратегічних цілей. Розробка національної стратегії БКП є першим та головним кроком у боротьбі з КЗ, де для розробки успішної та оптимальної національної стратегії необхідно проаналізувати наявні національні стратегії з безпеки та використати успішні практики протидії з метою уникнення КЗ (Tanriverdiyev, 2022, с. 19-21).

Запровадження управління національною БКП з метою задоволення потреб в державному органі для забезпечення координації й усунення невизначеності обумовлюється створенням ефективної організації, яка буде забезпечувати та контролювати всі можливі аспекти БКП для кожної країни (Senol, 2020, с. 1-3). Національна безпека відіграє важливу роль для мережевих технологій й забезпечує безпеку критичної інфраструктури. Забезпечення БКП критичної інфраструктури, тобто її захист від кібератак – є головною метою стратегії з БКП сучасних держав. Критична інфраструктура містить фізичні та віртуальні системи, забезпечення безпеки яких є невід'ємною частиною стратегії національної безпеки для сталого економічного розвитку держави (Daricili, 2021, с. 260-262).

Тому питання БКП досі залишається актуальним серед громадян та професіоналів усіх існуючих видів діяльності, які використовують цифрові технології. Тому для того, щоб визначити основні аспекти БКП необхідно розглянути планування та впровадження програм з підвищення обізнаності серед населення, які містять ключові стратегії, термінологію та оцінку ризиків (Dash, 2022, с. 1-2).

Актуальність проблеми. Актуальність безпеки інформаційного простору та БКП було одним з пріоритетних питань державної політики, а з врахуванням того факту, що сили оборони є невід'ємною складовою державної безпеки дослідження їх інформаційної безпеки є надзвичайно необхідним. Доцільність такого дослідження підтверджується тим, що в сучасних умовах розвитку інформаційних технологій сили оборони України повинні адаптуватися до сучасних викликів та загроз з метою забезпечення належного захисту інформації стратегічного значення для держави (Zolotar, 2021, с. 18-21).

Незважаючи на те, що Україна, як і інші країни, стикається з кібератаками, сучасні виклики для України пов'язані через військову агресію з боку країни-агресора, коли зловмисники (хакери) намагаються завдати шкоди та збитків урядовим установам, критичній інфраструктурі, приватним компаніям та громадянам України. Тому захист критичної інфраструктури спрямований на такі критичні об'єкти, як енергетично-паливний сектор, транспортний сектор та логістика, телекомунікації та інші важливі сектори, які забезпечують функціонування для повсякденного життя для громадян (Tymoshov, 2022, с. 138-140).

Іншим факторами є кіберзлочинність та недостатня свідомість (необізнаність), де шахрайство в Україні в умовах війни також залишається серйозною проблемою, включаючи «фішинг», обман, крадіжку даних, які врешті-решт призводять до втрати майна та грошових заощаджень з банківського рахунку (Alawida, 2022, с. 8176-8180). Недостатня свідомість характеризується тим, що безліч організацій та користувачів не володіють достатніми знаннями та свідомістю щодо загроз з питань БКП, що робить їх більш вразливими (Zwilling, 2020, с. 1-2).

Сучасні ефективні стратегії КЗ в Україні базуються на поєднанні технічних заходів, законодавчих рамок та освіти. Законодавча база характеризується тим, що Україна впроваджує законодавчі акти, які регулюють КЗ і кіберзлочинність, наприклад, Закон України «Про основні принципи забезпечення кібербезпеки», що встановлює правові засади захисту кіберпростору. На основі технічних заходів деякі організації в Україні використовують сучасні технології та рішення для захисту інформації та забезпечення конфіденційності даних, що обумовлюється використанням брандмауерів, антивірусів, систем виявлення вторгнень та інших інструментів. Однак збільшення свідомості про кібернетичні загрози та навчання персоналу відіграють найважливіше значення у стратегіях КЗ, що обумовлюється наданням знань університетами для навчання фахівців з обслуговування БКП (Negulescu, 2023, с. 66-73). З метою уникнення загроз проводяться регулярні та планові перевірки, де організації проводять регулярні аудити та планові перевірки систем КЗ для виявлення слабких місць та вразливостей (Oruj, 2023, с. 101-103).

З метою забезпечення безпеки кіберпростору необхідно дослідити стратегію, яка зможе забезпечити потреби держави, що характеризується вивченням методологічного підходу та аналізом ризиків виникнення загроз. Актуальною проблемою даного дослідження є вивчення потенційних загроз та викликів інформаційному простору з проведенням аналізу ефективних рішень для підвищення БКП в Україні.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Сучасні ІТ характеризуються використанням різних методів для трансформації майбутнього, наприклад, у роботі (Ferrag, 2020) авторами проведений огляд підходів глибокого навчання для виявлення вторгнень у БКП на основі використання набору даних, коли у роботі (Ma, 2021, с. 8000-8002) авторами досліджуються «розумні» технології, зокрема можливості «розумного» міста, які покращують життя для населення, але можуть містити ряд проблем з БКП. Проблеми безпеки пов'язані з тим, що «розумні» технології використовують системи Інтернету речей (IoT), де звичайні периферійні пристрої, датчики та системи моніторингу можуть бути вразливими для DDoS-атак з боку зловмисників. Незважаючи на цей недолік в Україні все ще бракує спеціального обладнання та систем, щоб забезпечити місто «розумними» технологіями, зокрема лише для задоволення потреб громадянина, який завдяки смартфону дистанційно керує з'єднаними пристроями та технікою. Однак індивідуальне використання таких технологій може викликати загрози безпеки, наприклад, зв'язуючи смартфон з електронним браслетом Mi Band й використовуючи функцію NFC (*Near field communication*) зловмисники можуть запо-

діяти шкоду, якщо отримають доступ конфіденційної інформації для дистанційного керування пристроями (Vieau, 2022, с. 12-16).

Розвиток ІТ та їх використання збільшує взаємопов'язану цифрову систему, що супроводжується інтенсивним використанням даних. Скрізь де доступні цифрові дані існує загроза кібератак, що збільшує потребу у профілактиці та пошуку нових методів боротьби з новими загрозами та проблемами. У роботах (Parpulova, 2021; Süzen, 2020) досліджується Індустрія 4.0, де основним «паливом» є дані кіберпростору (оцифрування даних) для критичної інфраструктури. Сфера транспортування енергоресурсів є надзвичайно важливою для будь-якої країни, однак на думку авторів рахуються вразливими, так як нафтохімічні трубопроводи є дорогими у будівництві та спроєктовані без особливого захисту від кібератак у будівництві. Вразливості БКП, які найбільш очевидні в системах Індустрії 4.0 складаються з протоколів систем управління й незахищеного з'єднання, що свідчить про знехтування деякими стратегіями БКП.

Однак разом з Індустрією 4.0 також активно розвивалися технології у галузі робототехніки та машинобудування, де цифрова революція призвела до того, що роботи стали інтегрованими для використання у різних сферах, наприклад, господарство, медицина, промисловість (Yaacoub, 2022). Однак, на думку авторів (Kucharska, 2020), деякі непередбачені аварії, які можуть спричинити зловмисники може призвести до негативних наслідків, які можуть загрожувати безпеці людей. Авторами відзначається, як зловмисники можуть викрадати роботів та контролювати їх свідомістю, що може призвести до економічних та фінансових збитків для країни.

Інформаційний захист та корпоративна стійкість до інформаційного витоку інформації та шахрайства в усіх його проявах є запорукою успіху для ефективного функціонування будь-якої організації, незалежно від типу та форми власності. Деякі з досліджень не можуть гарантувати кібербезпеку на практиці, але можуть доповнити та розширити наявні методи та технології. Авторами на основі огляду літератури у роботі (Loishyn, 2021, с. 1449) проведений аналіз за період 1999-2020 років, який дозволив простежити чітку тенденцію хакерських методів, де кіберзлочинці об'єднуються в онлайн-групи (наприклад, Anonymous, Red Hacker Alliance), які спільними зусиллями проводять атаку на зацікавлені об'єкти. Отримані дані у цій роботі свідчать про те, що об'єктами кібератак можуть бути державні організації, комерційні організації, банківські установи, приватні рахунки та акаунти, але характер та методи діяльності хакерів можуть мати не лише економічні цілі, але й політичні, що може прирівнюватися у деяких випадках до кібертерористів.

Серед практичних та ефективних методів підвищення безпеки інформаційного простору можуть слугувати оптимізація та посилення стратегічного лідерства, що є ключовими аспектами для забезпечення реалізації бачення БКП. У роботі (Lehto, 2021, с. 139-140) авторами зазначається, що стратегічне лідерство у сфері БКП передбачає визначення та постановку цілей, які засновані на захисті цифрового операційного середовища, а також передбачає координацію дій та готовність, що дозволяє проводити управління масштабними перебоями. Однак для того, щоб забезпечити БКП та досягти поставлених стратегічних цілей, суспільство має залучати різні сторони та узгоджувати ресурси й напрямки дій якомога ефективніше.

Основна термінологія з БКП, ризики та стратегії наведені у роботах (Chelani, 2022, с. 6-7; Mocean, 2023, с. 29-30; Yaacoub, 2021, с. 121-131; Suzen, 2020, с. 8-10; Negulescu, 2022, с. 68-72), де надається основна інформація та методологія для пошуку стратегій, які можуть ефективно використовуватися для БКП. Деякі світові дослідження досі вивчають негативний вплив заподіяної шкоди кіберзлочинцями, однак авторами у роботі (Guchua, 2022, с. 1) зауважено, що сьогоднішні захисні механізми не можуть цілком виправдати ефективно в ситуаціях, що склалася з державою-агресором, так як держава-агресор може переймати нові технології та використовувати їх для шкоди іншим країнам.

Метою даного дослідження є виявлення загроз для БКП з проведенням аналізу, який обумовлений: а) методологією; б) вивченням та описом основних ризиків, які можуть виникнути у БКП; в) пошуком ефективних рішень з використанням антивірусного програмного забезпечення для цифрових систем БКП. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **задачі**: проаналізувати основні методи та стратегії, які використовувалися за останні 5-10 років; проаналізувати основні ризики виникнення загроз у БКП; визначити основні вразливі критерії (параметри) у системі БКП. **Предметом дослідження** є кіберпростір та інформаційні технології. **Наукова новизна** даного дослідження полягає у пошуку методології, згідно з якою буде можливо провести аналіз виявлення потенційних загроз для БКП.

Виклад основного матеріалу дослідження. У даній роботі використовувалася методологія БКП на основі роботи (Kafol, 2017) з метою розкриття потенціалу можливостей протидії загрозам, які можуть виникнути з боку зловмисників – кіберзлочинців й проаналізуємо матеріал досліджень деяких робіт, які пов'язані з ризиками та виникненням шкідливих факторів. Кібернетичні атаки проаналізовані у дослідженні (Mocean, 2022), де буде описано основні фактори утворення ризиків сучасних БКП. З метою кращого вивчення та проведення аналізу використані джерела з термінологією (Tsaruk, 2020; Süzenm 2020), які допоможуть більш детально розкрити вразливі параметри у системі БКП.

Методологія. Превентивна методологія, яка досліджується й охоплює 3 елементи, а саме запобігання, виявлення та реагування, які здатні захищати 3 унікальні атрибути інформації: конфіденційність, цілісність та доступність. Ключовими аспектами такої методології є: таксономія – звіт (класифікація комунальних мереж з урахуванням типу та комунікаційних технологій з чутливістю до кібернетичних загроз); моделювання та імітація – програмне забезпечення цифрової моделі з віртуальним середовищем для моделювання та збору даних про кібератаки; програмне забезпечення для виявлення загроз (мережа, хост та процеси) та засобів кореляції подій; КЗ на основі методологічної основи з управляючими принципами. Окрім того, методи оцінки ризиків та вразливостей містять стандартні процедури та інструкції для запобігання кібератакам забезпечуючи конфіденційність та захист даних.

Побудова методології складається з 6 основних етапів, а саме: імітування (моделювання), аналіз, планування, розробка, побудова та експлуатація. Створення захисту для системи БКП враховує початкову фазу з імітуванням та аналізом на початковому етапі. Фаза планування, яка знаходиться між початковою фазою та фазою впровадження є ключовою для розробки та планування техніко-економічних критеріїв зі створенням належного рівня захисту. Інші три фази (розробка, побудова та експлуатація) є фазами впровадження й складаються з елементів, які необхідні для створення ресурсів та активів з метою захисту організації від кібератак. Цикл зворотного зв'язку призначений для того, щоб на початковій фазі можна було повернутися від фази аналізу до фази моделювання для перевірки параметрів. На етапі реалізації необхідно постійно повертатися від оперативної фази до фази розробки по колу, щоб постійно вдосконалювати захист від постійно мінливого ворожого середовища. Існує також необхідність постійно повертатися від фази реалізації до початкової фази для того, щоб оцінити, чи стратегія з тактикою ще стійкі. На рис. 1 показано методологію з шести основних етапів.

Етап моделювання складається з наступних операцій:

– побудова моделі топології системи або мережі (ключові об'єкти, які здатні увімкнути комп'ютери та технічні пристрої, наприклад, прилади обліку електроенергії, споживачі електроенергії тощо);

– ймовірнісні змінні визначаються для різних подій, які мають відношення до потенційних кібератак на різних вузлах, з'єднаннях, де ймовірності у результаті оцінюються й призначаються для різних змінних;

– моделювання дискретних подій для мережевої моделі та ймовірнісних змінних, які причетні до кібератак;

– результати моделювання підлягають агрегації для статичного виявлення вразливих місць мережевих об'єктів.

Проведення аналізу відбувається на основі систематичного та цілісного підходу, де спочатку кожен об'єкт у модельованій топології аналізується ізольовано. У разі, якщо він піддається високим ризикам безпеки, це є індикатором того, що необхідно вжити відповідних заходів безпеки для уникнення та зменшення ризиків. Часткові ризики окремого об'єкта оцінюються на основі частоти змодельованих кібератак на цей об'єкт.

Під час проведення аналізу необхідно провести оцінку серйозності ризиків, якщо об'єкти модельованої мережі взаємопов'язані з багатьма іншими об'єктами, які також піддаються високій частоті змодельованих кібератак, то серйозність ризику для об'єкта є критично важливим. У подібних випадках приймаються та впроваджуються заходи з уникнення ризиків, які повинні призвести до модифікації та поліпшення топології мережі, а також до ітеративного повторення кроку моделювання.

Проведення планування є важливим при розробці бажаного рівня безпеки, де техніко-економічне обґрунтування необхідно проводити для оцінки підходу з висвітленням результатів попередніх двох етапів для визначення економічної доцільності дій. Для планування залучаються всі зацікавлені сторони, а визначені ризики повинні враховуватися в стратегіях їх зменшення. Економічна та технічна ефективність сценаріїв оцінюється шляхом застосування багатокритеріальної моделі, що підтри-

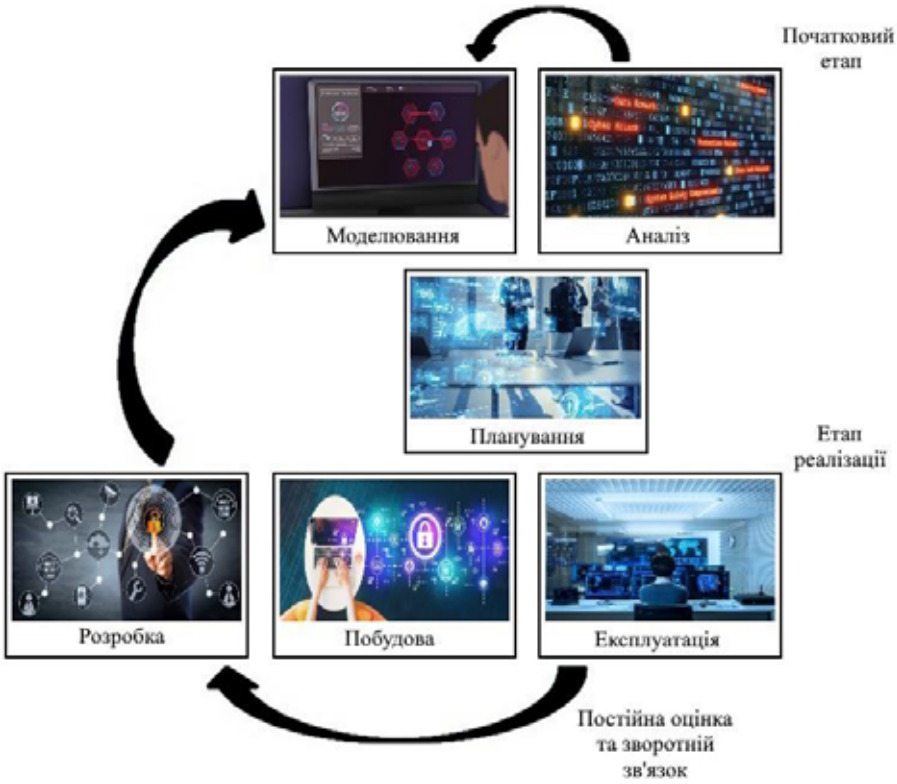


Рис. 1. Побудова методології на основі шести етапів

Джерело: сформовано авторкою на основі (Kafol, 2017)

має неповну або нечітку інформацію, а також з врахуванням різних структур і стилів переваг в умовах групового прийняття рішень.

На етапі планування необхідно ретельно та систематично розглянути три ключові елементи процесу забезпечення кібербезпеки. На основі виявлених та проаналізованих ризиків можна визначити стійкі стратегії запобігання, а ефективні стратегії реагування та механізми можуть використовуватися для подолання виявлених загроз безпеці, атак та проблем у системі БКП.

Фаза розробки є першим кроком процесу впровадження, де процес розробки повинен здійснюватися у всіх сферах з людськими ресурсами, апаратними та програмними компонентами. Визначення ключових елементів для операційного центру безпеки (ОЦБ) є важливою частиною цього етапу, а також глибини та способу функціонування.

Етап побудови є другорядною частиною процесу впровадження і складається з придбання та встановлення елементів ОЦБ, який обладнаний для моніторингу, управління освітленням, сигналізацією та бар'єрами.

Етап експлуатації починається з введення системи в експлуатацію та запуску ОЦБ у виробництво, де мають вирішуватися операційні, організаційні та культурні питання. Зусилля, які спрямовані на підвищення ефективності роботи ОЦБ, зосереджені на створенні інструментів для аналітиків або розумінні людських та організаційних факторів. Пробна експлуатація повинна окреслити потенційні проґалини та загрози безпеці. На етапі експлуатації необхідно постійно оцінювати ефективність і зворотний зв'язок з етапом розробки, встановлений для усунення потенційних прогалин. Важливо підкреслити, що останні три фази повинні постійно повторюватися, щоб реагувати на зміни у кібернетичному середовищі та підтримувати і покращувати рівень кібербезпеки. Якщо зворотний зв'язок та реагування відбувається швидше, ніж змінюється середовище, рівень безпеки підвищується, а якщо повільніше – знижується.

Структура виявлення вразливих компонентів у системі БКП. Розглянемо коротко структуру з виявлення вразливих компонентів у системі БКП на рис. 2, де кожен вразливий фактор може слугувати кібернетичною атакою. На рисунку 2 детально показані вразливі місця, які можуть бути цілями кібератак, починаючи з електронної пошти і закінчуючи атакою на об'єкти інфраструктури.

Акаунти електронної пошти: підробка електронної пошти з використанням методів викрадення паролів по словнику; бомбардування,

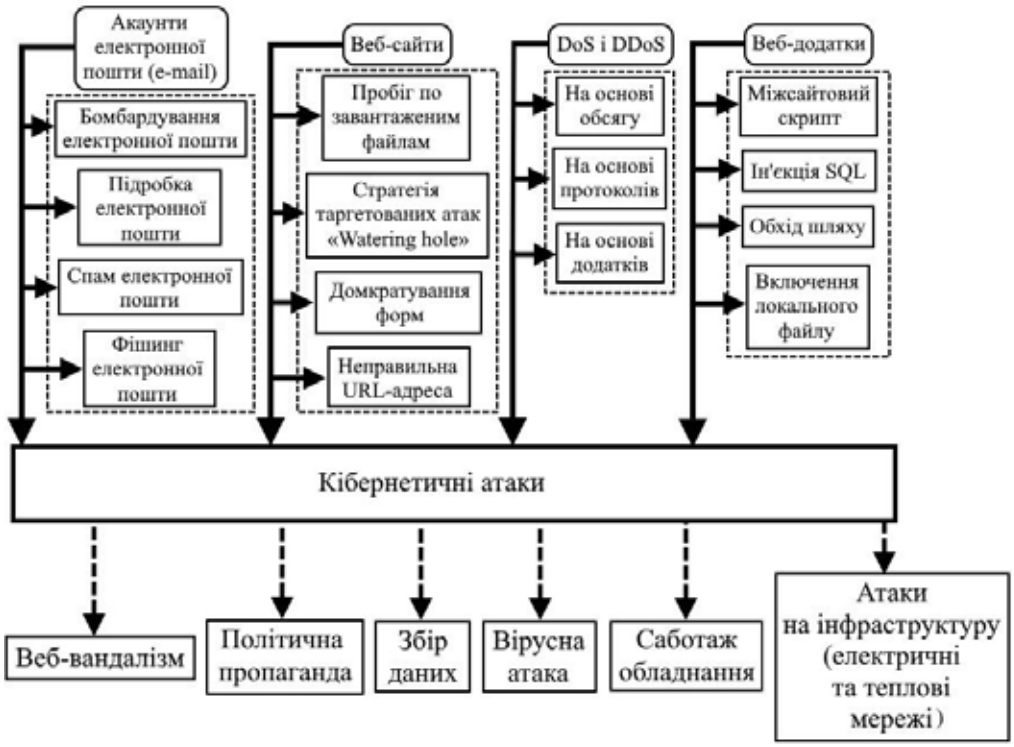


Рис. 2. Вразливі компоненти до кібератак в системі КПБ

Джерело: сформовано авторкою на основі (Mocean, 2023)

наприклад, Hacker Bomber; спам; фішинг (підміна сайту надійних організацій та установ), де користувачеві надсилають електронний лист з підробленою адресою, яка не відноситься до безпечних сайтів й вводить користувача в оману;

DoS-атаки відбуваються з використанням десятків тисяч скомпрометованих комп'ютерів для перевищення пропускної здатності веб-сервера за рахунок трафіку. Після запуску атаки важко зупинити, тому що інформаційні потоки надходять з різних місць. У випадку такої атаки, веб-сторінки швидко переповнюються фальшивими доступом запущеними зі скомпрометованих комп'ютерів, розкиданих по всьому світ

Вразливості, які виникають з веб-сайтами та веб-додатками обумовлюється: недостатньою аутентифікацією з авторизацією; SQL-ін'єкцією (зловмисні SQL-коди); міжсайтовим скриптингом (XSS), вразливостями на сервері (що потребує оновлення веб-серверів та фреймворків для уникнення використання вразливостей); незахищеними завантаженням файлів; вразливостями на боці клієнта та інше.

Проаналізуємо види кібератак:

– веб-вандалізм (призводить до пошкодження веб-сторінок й відмови в доступі до певних сторінок, де атаки швидко протидіють й завдають менш значної шкоди;

– пропаганда (повідомлення політичного змісту та характеру, які можуть поширюватися будь-ким, хто має доступ до мережі Інтернет, наприклад, втручання у вибори, фальсифікація голосів, опублікування фейкових результатів);

– збір даних (секретна інформація, яка не захищена може перехоплюватися й змінюватися, що прирівнюється до шпигунства);

– атаки комп'ютерних вірусів (після активації вірус завдає шкоди, змінює або знищує інформацію, створює фіктивні транзакції з передачею даних;

– саботаж обладнання (військова діяльність, яка використовує комп'ютери та супутники для координації і відноситься до вразливих таких атак;

– атаки на критичну інфраструктуру (комунальні послуги, енергоресурси, торгівля, транспорт та логістика відноситься до вразливих об'єктів).

Використання антивірусного програмного забезпечення. Вибір антивірусного програмного забезпечення залежить від ситуації, потреб та пристроїв. Розглянемо декілька відомих пакетів антивірусного програмного забезпечення:

1. Bitdefender, який характеризується своєю ефективністю та низьким впливом на продуктивність системи.

2. Kaspersky, який має сильну репутацію через виявлення та захист від широкого спектру загроз.

Таблиця 1

Порівняння ефективності виявлення загроз безпеки для БКП

Продукт	Блок та захист	Захист	Попередження
Avast	728	99,3%	3
Bitdefender	732	99,8%	4
ESET NOT32	729	99,4%	11
Kaspersky	732	100%	0
McAfee	729	99,5%	7
Norton	727	98,9%	16

3. Norton, який містить додаткові інструменти для онлайн-безпеки та КЗ.

4. McAfee, який пропонує захист від антивірусів та інших загроз, а також надає інструменти для безпеки в Інтернеті.

5. ESET NOT32, який відомий за своєю швидкістю та ефективністю виявлення загроз.

6. Avast, який містить безкоштовну версію та включає в себе додаткові функції (захист від шпигунського програмного забезпечення та файрвол – брандмауер).

Таким чином, для системи БКП можуть застосовуватися різні види антивірусного програмного забезпечення, однак варто врахувати те, що безліч експериментів у кіберпросторі проводилися з використанням Kaspersky.

Як видно з табл. 1, найбільш ефективним антивірусним програмним забезпеченням є Kaspersky, в якому з виявлених 732 загроз було заблоковано та переміщено у карантин із захистом 100%, коли у Norton найменший показник захисту 98,9% й найбільший показник попереджень з виявленням потенційних 16 загроз. Отже, для використання систем БКП антивірусне програмне забезпечення Kaspersky може забезпечити ефективну та безпечну роботу у кіберпросторі.

Висновки і перспективи подальших досліджень. У даній роботі проаналізовані потенційні загрози та виклики для системи БКП, що обґрунтовано наступним: розглянута та проаналізована методологія побудови захисту системи, яка складається з шести основних етапів: моделювання, аналіз, планування, розробка, побудова та експлуатація. Окрім зазначених етапів в побудову даної методології входить також цикл зворотного зв'язку, функція якого є повернення на початкову фазу аналізу або до фази імітування з метою перевірки параметрів.

Проаналізовано структуру з метою виявлення вразливих компонентів у системі БКП. З'ясовано, що система БКП може зазнавати як найменший шкідливий вплив з використанням веб-сайтів, веб-додатків, так і критичний з проведенням DoS та DDoS-атак, що може значно навантажувати систему через використання значної кількості скомпрометованих комп'ютерів для перевищення пропускної здатності веб-сервера. Проаналізовані види кібератак, які можуть вживатися з окремою метою, наприклад, пропаганда є спробою внутрішнього втручання у парламентські або президентські вибори, а атаки на критичну інфраструктуру можуть значно вплинути на функціонування міста, що пояснюється роботою цифрових технологій та комунікацій, наприклад, транспорт, електропостачання. В окремих випадках кібербезпека є важливою з точки зору оборони держави, коли необхідно використовувати ІТ для моніторингу подій, які можуть загострюватися у результаті військової агресії двох сусідніх країн.

На основі проведеного дослідження було проаналізовано 6 різних пакетів антивірусного програмного забезпечення, де результати показали, що антивірус Kaspersky має значну перевагу у використанні на відміну від інших пакетів антивірусних програм. Серед наведених продуктів найкращі показники має Kaspersky, який заблокував 732 файли з рівнем захисту у 100% без виявлення помилок та попереджень, коли продукт Norton має найнижчі показники ефективності.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Kafol C., & Bregar A. Cyber Security–Building a Sustainable Protection. *DAAAM International Scientific Book*, 2017. Pp. 81-90.

2. Rajasekharaiah K.M., Dule C.S., & Sudarshan E. Cyber security challenges and its emerging trends on latest technologies. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* 2020.Vol. 981, No. 2, p. 022-062. IOP Publishing, 1-7.

3. Karpiuk M. Organisation of the National System of Cybersecurity: Selected Issues. *Studia Iuridica Lublinensia*, 2021. Vol. 30(2), pp. 233-244.

4. Mocean L., & Vlad M.P. Cybersecurity in the post covid era. *Fiat Iustitia*, 2022. Vol. (2), pp. 26-36.

5. Tsaruk O., & Korniiets M. Hybrid nature of modern threats for cybersecurity and information security. *Smart Cities and Regional Development (SCRD) Journal*, 2020. Vol. 4(1), pp. 57-78.

6. Bejan F. Cybersecurity and Cybercrime: Challenges Of An Invisible Space. *Perspectives of Law and Public Administration*, 2022. Vol. 11(1), pp. 5-10.

7. Tanriverdiyev E. The state of the cyber environment and national cybersecurity strategy in developed countries. *Studia Bezpieczeństwa Narodowego*, 2022. Vol. 23(1), pp. 19-26.

8. Senol M., & Karacuha E. Creating and implementing an effective and deterrent national cyber security strategy. *Journal of Engineering*, 2020, pp. 1-19.

9. Daricili A.B., & Celik S. National Security 2.0: The Cyber Security of Critical Infrastructure. *PERCEPTIONS: Journal of International Affairs*, 2022. Vol. 26(2), pp. 259-276.

10. Dash B., & Ansari M.F. An Effective Cybersecurity Awareness Training Model: First Defense of an Organizational Security Strategy, 2022. Pp. 1-6.

11. Zolotar O.O., Zaitsev M.M., Topolnitskyi V.V., Bieliakov K.I., & Koropatnik I.M. Prospects and Current Status of Defence Information Security in Ukraine. *Hasanuddin Law Review*, 2022. Vol. 8(1), pp. 18-29.

12. Alawida M., Omolara A.E., Abiodun O.I., & Al-Rajab M. A deeper look into cybersecurity issues in the wake of Covid-19: A survey. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*. 2022.

13. Zwilling M., Klien G., Lesjak D., Wiechetek Ł., Cetin F., & Basim H. N. Cyber security awareness, knowledge and behavior: A comparative study. *Journal of Computer Information Systems*, 2022. Vol. 62(1), pp. 82-97.

14. Tymoshov Y. Ukraine's national security sector: challenges and threats in the information space. *Reality of Politics. Estimates-Comments-Forecasts,* 2022. Vol. 21(3), pp. 137-149.

15. Negulescu O.H., Doval E., & Stefanescu A.R. Actual and future digital threats and their impact on civil and military cybersecurity management. *Przegląd Nauk o Obronności*, 2023. Vol. (15), pp. 60-84.

16. Oruj Z. Cyber Security: contemporary cyber threats and National Strategies. *Distance Education in Ukraine: Innovative, Normative-Legal, Pedagogical Aspect*s, 2023. Vol. (2), pp. 100-116.

17. Ferrag M.A., Maglaras L., Moschoyiannis S., & Janicke H. Deep learning for cyber security intrusion detection: Approaches, datasets, and comparative study. *Journal of Information Security and Applications*, 2020. Vol. 50, 102419, pp. 1-19.

18. Ma C. Smart city and cyber-security; technologies used, leading challenges and future recommendations. *Energy Reports*, 2021. Vol. 7, pp. 7999-8012.

19. Vieau M. Innovative Methods Cybersecurity Professionals Can Use to Reduce Threats against RFID Authentication Systems (Doctoral dissertation, Colorado Technical University). 2022.

20. Parpulova N., & Zinoviev V. Cybersecurity in the Transportation of Energy Resources. *Godishnik na UNSS*, 2021. Vol. (2), pp. 131-146.

21. Süzen A.A. A risk-assessment of cyber attacks and defense strategies in industry 4.0 ecosystem. *International Journal of Computer Network and Information Security*, 2020. Vol. (1), pp. 1-12.

22. Yaacoub J.P.A., Noura H.N., Salman O., & Chehab A. Robotics cyber security: Vulnerabilities, attacks, countermeasures, and recommendations. *International Journal of Information Security*, 2022. Pp. 1-44.

23. Kucharska A. Cybersecurity challenges in Poland in the face of energy transition. *Rocznik Instytutu Europy Środkowo-Wschodniej*, 2020. Vol. 18(1), pp. 141-159.

24. Loishyn A.A., Hohoniants S., YaTkach M., Tyshchenko M.H., Tarasenko N.M., & Kyvliuk V.S. Development of the Concept of Cybersecurity of the Organization. *TEM Journal*, 2021. Vol. 10(3), pp. 1-7.

25. Lehto M., & Limnéll J. Strategic leadership in cyber security, case Finland. *Information Security Journal: A Global Perspective*, 2021. Vol. 30(3), pp. 139-148.

26. Ghelani D., Hua T.K., & Koduru S.K.R. Cyber Security Threats, Vulnerabilities, and Security Solutions Models in Banking. *Authorea Preprints,* 2022. Pp. 1-9.

27. Guchua A., & Zedelashvili T. The Problem of Security Protection of Strategic *Objects in the Conditions of Modern Cybersecurity*, 2022. Pp. 1-8.

REFERENCES:

1. Kafol, C., & Bregar, A. (2017). Cyber Security–Building a Sustainable Protection. *DAAAM International Scientific Book*, 81-90.

2. Rajasekharaiah, K.M., Dule, C.S., & Sudarshan, E. (2020). Cyber security challenges and its emerging trends on latest technologies. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 981, No. 2, p. 022-062). IOP Publishing, 1-7.

3. Karpiuk, M. (2021). Organisation of the National System of Cybersecurity: Selected Issues. *Studia Iuridica Lublinensia*, 30(2), 233-244.

4. Mocean, L., & Vlad, M.P. (2022). Cybersecurity in the post covid era. *Fiat Iustitia*, (2), 26-36.

5. Tsaruk, O., & Korniiets, M. (2020). Hybrid nature of modern threats for cybersecurity and information security. *Smart Cities and Regional Development (SCRD) Journal*, 4(1), 57-78.

6. Bejan, F. (2022). Cybersecurity And Cybercrime: Challenges Of An Invisible Space. *Perspectives of Law and Public Administration*, 11(1), 5-10.

7. Tanriverdiyev, E. (2022). The state of the cyber environment and national cybersecurity strategy in developed countries. *Studia Bezpieczeństwa Narodowego*, 23(1), 19-26.

8. Senol, M., & Karacuha, E. (2020). Creating and implementing an effective and deterrent national cyber security strategy. *Journal of Engineering*, 2020, 1-19.

9. Daricili, A.B., & Celik, S. (2022). National Security 2.0: The Cyber Security of Critical Infrastructure. *PERCEPTIONS: Journal of International Affairs*, 26(2), 259-276.

10. Dash, B., & Ansari, M.F. (2022). An Effective Cybersecurity Awareness Training Model: First Defense of an Organizational Security Strategy, 1-6.

11. Zolotar, O.O., Zaitsev, M.M., Topolnitskyi, V.V., Bieliakov, K.I., & Koropatnik, I.M. (2022). Prospects and Current Status of Defence Information Security in Ukraine. *Hasanuddin Law Review*, 8(1), 18-29.

12. Alawida, M., Omolara, A.E., Abiodun, O.I., & Al-Rajab, M. (2022). A deeper look into cybersecurity issues in the wake of Covid-19: A survey. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*.

13. Zwilling, M., Klien, G., Lesjak, D., Wiechetek, Ł., Cetin, F., & Basim, H. N. (2022). Cyber security awareness, knowledge and behavior: A comparative study. *Journal of Computer Information Systems*, 62(1), 82-97.

14. Tymoshov, Y. (2022). Ukraine's national security sector: challenges and threats in the information space. *Reality of Politics. Estimates-Comments-Forecasts,* 21(3), 137-149.

15. Negulescu, O.H., Doval, E., & Stefanescu, A.R. (2023). Actual and future digital threats and their impact on civil and military cybersecurity management. *Przegląd Nauk o Obronności*, 2022(15), 60-84.

16. Oruj, Z. (2023). Cyber Security: contemporary cyber threats and National Strategies. *Distance Education in Ukraine: Innovative, Normative-Legal, Pedagogical Aspect*s, (2), 100-116.

17. Ferrag, M.A., Maglaras, L., Moschoyiannis, S., & Janicke, H. (2020). Deep learning for cyber security intrusion detection: Approaches, datasets, and comparative study. *Journal of Information Security and Applications*, 50, 102419, 1-19.

18. Ma, C. (2021). Smart city and cyber-security; technologies used, leading challenges and future recommendations. *Energy Reports*, 7, 7999-8012.

19. Vieau, M. (2022). Innovative Methods Cybersecurity Professionals Can Use to Reduce Threats against RFID Authentication Systems (Doctoral dissertation, Colorado Technical University).

20. Parpulova, N., & Zinoviev, V. (2021). Cybersecurity in the Transportation of Energy Resources. *Godishnik na UNSS*, (2), 131â-146.

21. Süzen, A.A. (2020). A risk-assessment of cyber attacks and defense strategies in industry 4.0 ecosystem. I*nternational Journal of Computer Network and Information Security*, (1), 1-12.

22. Yaacoub, J.P.A., Noura, H.N., Salman, O., & Chehab, A. (2022). Robotics cyber security: Vulnerabilities, attacks, countermeasures, and recommendations. *International Journal of Information Security*, 1-44.

23. Kucharska, A. (2020). Cybersecurity challenges in Poland in the face of energy transition. *Rocznik Instytutu Europy Środkowo-Wschodniej*, 18(1), 141-159.

24. Loishyn, A.A., Hohoniants, S., YaTkach, M., Tyshchenko, M.H., Tarasenko, N.M., & Kyvliuk, V.S. (2021). Development of the Concept of Cybersecurity of the Organization. *TEM Journal*, 10(3), 1-7.

25. Lehto, M., & Limnéll, J. (2021). Strategic leadership in cyber security, case Finland. *Information Security Journal: A Global Perspective*, 30(3), 139-148.

26. Ghelani, D., Hua, T.K., & Koduru, S.K.R. (2022). Cyber Security Threats, Vulnerabilities, and Security Solutions Models in Banking. *Authorea Preprints,* 1-9.

27. Guchua, A., & Zedelashvili, T. (2022). The Problem of Security Protection of Strategic *Objects in the Conditions of Modern Cybersecurity*, 1-8.

UDC 004:005
DOI https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-7

Dmytro OLKHOVSKYI
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Computer Science and Information Technology, Poltava University of Economics and Trade, 3 Koval str., Poltava, Ukraine, 36014, dmitriy@olhovsky.name
***ORCID:** 0000-0003-0313-6977*
***Scopus Author ID:** 55328301800*

Olena OLKHOVSKA
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Computer Science and Information Technology, Poltava University of Economics and Trade, 3 Koval str., Poltava, Ukraine, 36014, lena@olhovsky.name
***ORCID:** 0000-0001-5366-5995*
***Scopus Author ID:** 42262220700*

Yurii OLEKSIICHUK
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Computer Science and Information Technology, Poltava University of Economics and Trade, 3 Koval str., Poltava, Ukraine, 36000, olexijchuk@gmail.com
***ORCID:** 0000-0002-0585-3307*
***Scopus Author ID:** 54904496400*

Oksana ORIKHIVSKA
Senior lecturer at the Department of Computer Science and Information Technology, Poltava University of Economics and Trade, 3 Koval str., Poltava, Ukraine, 36000, aka.jeita@gmail.com
***ORCID:** 0000-0003-2775-0832*

Nina RUDENKO
Senior Lecturer at the Business Foreign Language Department, Poltava University of Economics and Trade, 3 Koval str., Poltava, Ukraine, 36000, ninarudenko7@gmail.com
***ORCID:** 0000-0002-3603-8786*

To cite this article: Olkhovskyi, D., Olkhovska, O., Oleksiichuk, Yu., Orikhivska O., Rudenko, N. (2023). Upravlinnia proiektamy v IT-sferi: mozhlyvosti ta analiz prohramnoho zabezpechennia [IT project management: opportunities and software analysis]. *Information Technology: Computer Science, Software and Cyber Communications*, 3, 60–64, doi: https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-7

IT PROJECT MANAGEMENT: OPPORTUNITIES AND SOFTWARE ANALYSIS

The article considers the role of the IT industry in the economy of Ukraine, its revival and development against the background of difficult conditions. The authors emphasize the importance of optimizing management processes. IT service management includes the design, provision, administration and improvement of IT services in an organization or company. Thanks to this, the IT organization can support all business processes as much as possible, because existing software tools can be used not only to optimize IT. In recent years, they have been increasingly used for business processes and other industries. Means of automatic rescheduling of tasks become especially important for large projects taking into account resource limitations, when the manager is not able to independently analyze the reasons for the lack of resources and find a solution for each specific type of work. The publication analyzes modern software tools for IT project management, focusing on three key tools: Jira, Miro and Figma. These programs help streamline project management, increase the efficiency of IT companies and reduce time and resource costs. The article also covers popular alternatives to these tools such as Lucidchart, Cacoo, RealtimeBoard, and Conceptboard. It is the services discussed in the article that are designed to automate current tasks, and a single data environment helps to improve methodology, communication and speed up the work of service departments. Tracking completed tasks and evaluating employee performance makes it easier to distribute the workload of an enterprise's IT team, as well as evaluate its effectiveness.

Thus, thanks to its clear structure, IT product management allows to create effective and sustainable solutions. In the future, it is planned to conduct research aimed at summarizing the practice of using software products in the IT industry.

Key words: *IT project management, Jira, Miro, Figma, Lucidchart, Cacoo, RealtimeBoard, Conceptboard, Microsoft Project, Trello.*

Дмитро ОЛЬХОВСЬКИЙ
кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Полтавський університет економіки і торгівлі, вул. Коваля, 3, м. Полтава, Україна, 36014, dmitriy@olhovsky.name
ORCID: *0000-0003-0313-6977*
Scopus Author ID: *55328301800*

Олена ОЛЬХОВСЬКА
кандидат фізико-математичних наук, завідувач кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Полтавський університет економіки і торгівлі, вул. Коваля, 3, м. Полтава, Україна, 36014, lena@olhovsky.name
ORCID: *0000-0001-5366-5995*
Scopus Author ID: *42262220700*

Юрій ОЛЕКСІЙЧУК
кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Полтавський університет економіки і торгівлі, вул. Коваля, 3, м. Полтава, Україна, 36014, olexijchuk@gmail.com
ORCID: *0000-0002-0585-3307*
Scopus Author ID: *54904496400*

Оксана ОРІХІВСЬКА
старший викладач кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Полтавський університет економіки і торгівлі, вул. Коваля, 3, м. Полтава, Україна, 36014, aka.jeita@gmail.com
ORCID: *0000-0003-2775-0832*

Ніна РУДЕНКО
старший викладач кафедри ділової іноземної мови, Полтавський університет економіки і торгівлі, вул. Коваля, 3, м. Полтава, Україна, 36014, ninarudenko7@gmail.com
ORCID: *0000-0002-3603-8786*

Бібліографічний опис статті: Ольховський, Д., Ольховська, О., Олексійчук, Ю., Оріхівська О., Руденко, Н. (2023). Управління проєктами в IT-сфері: можливості та аналіз програмного забезпечення. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security,* 3, 60–64, doi: https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-7

УПРАВЛІННЯ ПРОЄКТАМИ В IT-СФЕРІ: МОЖЛИВОСТІ ТА АНАЛІЗ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

У статті розглядається роль IT-галузі в економіці України, її відродження та розвиток на тлі складних умов. Автори акцентують увагу на важливості оптимізації управлінських процесів. Управління IT-послугами включає розробку, надання, адміністрування та поліпшення IT-послуг в організації або компанії. Завдяки цьому, IT-організація може максимально підтримувати всі бізнес-процеси, адже існуючі програмні інструменти можуть бути використані не лише для оптимізації IT. В останні роки вони також все частіше використовуються для бізнес-процесів і в інших галузях. Засоби автоматичного перепланування завдань з урахуванням обмежень на ресурси набувають особливої важливості для великих проєктів, коли менеджер не в змозі самостійно проаналізувати причини браку ресурсів і знайти рішення для кожної конкретної роботи. У публікації здійснюється аналіз сучасних програмних інструментів для управління IT-проєктами, акцентуючи увагу на трьох ключових інструментах: Jira, Miro та Figma. Ці програми допомагають оптимізувати управління проєктами, збільшувати результативність IT-компаній та знижувати часові та ресурсні витрати. В статті також розглядаються популярні аналоги цих

інструментів, такі як Lucidchart, Cacoo, RealtimeBoard та Conceptboard. Саме розглянуті у статті сервіси призначені для автоматизації поточних завдань, а єдине середовище даних допомагає поліпшити методологію, комунікацію і прискорити роботу сервісних служб. Відстеження завершених завдань і оцінка продуктивності співробітників спрощують розподіл робочого навантаження IT-команди підприємства, а також оцінку її ефективності. Таким чином, завдяки своїй чіткій структурі управління IT-продуктами дозволяє створювати ефективні та стійкі рішення. У подальшому планується провести дослідження, спрямовані на узагальнення практики використання програмних продуктів в IT-галузі.

Ключові слова: *управління IT-проєктами, Jira, Miro, Figma, Lucidchart, Cacoo, RealtimeBoard, Conceptboard, Microsoft Project, Trello.*

Relevance of the problem. The full-scale war in Ukraine has left a devastating impact on all sectors of the economy. But, despite all the difficulties, the IT market is perhaps the only sector of the economy that continues to develop, creates new jobs, implements new projects, and attracts investments. The IT industry has become the backbone of Ukraine and, according to forecasts, can become the basis for development. The accelerated development of the IT industry in Ukraine took place even before the full-scale war. Thus, according to official data for 2021, the IT industry brought almost 7 billion foreign currency earnings to the economy of Ukraine and paid 23.5 billion hryvnias in taxes. According to official data from the press service of the Ministry of Digital Transformation, in 2022 IT companies-maintained 95 percent of contacts and continued to increase exports. During the first quarter of 2022, the IT industry generated a record two billion dollars in export earnings against $1.44 billion in the same period of 2021. Speaking about the development of the IT industry, we mean the IT industry export – this is the restoration of jobs, domestic demand for goods and services, and volunteer assistance.

Analysis of recent research and publications. The dynamic development of the IT sector is constantly updating the issue of optimizing management processes and consistent and in-depth analysis. The issues of methods and principles of organizing project activities are covered in the publications of such scientists as O.A. Smetanyuk, A.V. Bondarchuk, D.P. Kucherov, M.Ya. Hvozd, Yu.O. Zlydnyk, V.E. Chuhlib, L.L. Veduta, M.A. Demydenko, I.O. Peryt, G. Podesva, S. Blaze, K. Brans, B. Johnson, K. Wagers and many others.

Highlighting previously unsolved parts of the overall problem. Software tools for modeling business processes and managing IT projects are considered, as well as practical recommendations for the use of modern technologies in modeling business processes and managing IT projects of varying complexity are provided.

The purpose of research is to study theoretical and methodological approaches to managing IT projects.

Presentation of the main research material. There are many businesses analysis and project management software and web services designed to help manage IT projects. Let's consider a few of them that may be useful:

Trello is a free web service for project and task management. It allows creating boards to organize tasks using cards that can be arranged in different lists. Trello also has mobile apps allowing users to easily manage projects from their smartphones.

Microsoft Project is a project management software that can help you plan and manage projects. The program allows managers to create different types of schedules, which helps determine project time and resource constraints. There is a free trial version of the program that can be used for a limited time (Clark A., 2013; Harold R., 2014).

Lucidchart is an online diagramming tool (Гвоздь М.Я., 2018) that can be useful for business process analysis and structure diagrams. This tool allows users to create diagrams in Flowchart, ERD, UML and other formats.

Tableau Public is a free data visualization tool. It allows professionals to create interactive charts and graphs, which help in analyzing data and learning trends.

GanttProject is a planning and management software project. It allows to create Gantt charts (Кузьміних В.О, 2019) showing the schedule for completing tasks and meeting deadlines.

Google Analytics is a tool from Google that allows analyzing traffic and visitor behavior on a website. This can be useful for analyzing customer requirements and understanding their needs.

Google Docs is a free web service for creating and editing documents that can be useful for collaborating on a project. Google Docs allows you to collaborate on documents and edit them in real time (Harold R., 2014).

Asana is a project management tool that can be useful for planning and executing tasks. Asana allows you to create tasks, assign due dates to them, and track the status of tasks.

Draw.io is a free diagramming web service that can be useful for process analysis and structure diagrams. This tool allows you to create diagrams in the format of Flowchart, ERD, UML and other formats.

MindMeister is a mind mapping tool that can be useful for organizing thoughts and ideas. MindMeister allows creating a project concept map and editing it together with other users.

Thus, Miro is a very useful tool to use in IT process planning (Катренко А.В., 2021). It is an online project collaboration board that allows users to work together to create mind maps, flow charts, sketches, prototypes, and more.

Miro has a free mode for small teams and offers a variety of collaboration tools such as comments, bookmarks, integrations with other software, and more. In addition, Miro allows users to communicate with each other in real time, discuss issues and suggest solutions.

Other popular analogues of Miro that may be useful to users include such tools as Lucidchart, Cacoo, RealtimeBoard, Conceptboard (Чухліб В.Є., 2018). These services allow you to create mind maps, flow charts, and other collaborative content, and they also have free and paid usage modes.

Figma is another useful tool to use in IT project management. It's a web application for creating designs, prototypes, and more, allowing to work on projects in real time and collaborate with other team members. Figma allows you to create design layouts, including user interface elements, flow charts, mind maps, and other materials that will help users develop and analyze designs. Figma also offers various collaboration tools such as comments, change tracking, editing, and more. In addition, Figma has a free and paid usage mode, which can be helpful for users working on projects in groups. The free mode allows you to create an unlimited number of projects and add an unlimited number of members, making it ideal for small groups of users.

Therefore, Figma can be a useful tool for users working on projects in the field of business analysis and project management. It allows you to create professional design, prototypes and other materials that help develop skills and knowledge in this field.

Conclusions and prospects for further research. Thus, this publication provides an overview of software tools that are useful in the implementation of IT projects. With the help of these software applications, it is possible to manage project teams that have the main goal of improving the performance of IT companies and optimizing its time and resource costs. The Jira bug tracking system is very popular among IT professionals, which provides an opportunity to manage the project, fix errors and distribute tasks between performers.

In the future, it is planned to conduct research aimed at generalizing the practice of using software products in IT.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Родащук Г. Ю., Концеба С. М., Ліщук Р. І., Скуртол С. Д. Мережеве планування в управлінні ІТ-проектами. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*, 1, 2023. С. 42-56.

2. Катренко А. В. Управління ІТ-проектами. Львів: «Новий Світ – 2000». 2021. 550 с.

3. Довгань Л.Є., Мохонько Г.А., Малик І.П. Управління проектами: навчальний посібник до вивчення дисципліни для магістрів галузі знань 07 «Управління та адміністрування» спеціальності 073 «Менеджмент». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 420 с.

4. Сметанюк О. А., Бондарчук А. В. Особливості системи управління проєктами в ІТ-компаніях. Агросвіт. 2020. № 10. С. 105–111. doi: 10.32702/2306-6792.2020.10.105

5. Кузьміних В. О., Тараненко Р. А. Основи управління ІТ проектами: навч. посіб. для студ. спеціальності 122 «Комп'ютерні науки». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 75 с.

6. Гвоздь М.Я., Злидник Ю.О. AGILE – нова методологія менеджменту: теоретичні аспекти. *Електронний журнал «Інфраструктура ринку».* 2018. № 25. С. 230-234.

7. Чухліб В.Є, Ведута Л.Л. Сучасні методи управління проектами. *Сучасні підходи до управління підприємством*. 2018. №. 3. С. 234-243.

8. Нечволода Л.В., Пилипенко К.В. Удосконалення календарного планування виконання ІТ-проекту. *Економічний вісник Донбасу*. 2018. No 1(51). С. 87-91.

9. Перит І. О. Перспективи впровадження Kanban в управління бізнесом вітчизняних суб'єктів господарювання. *Бізнес Інформ.* 2019. № 8. С. 218-228.

10. Clark A. Campbell, Mick Campbell. The New One-Page Project Manager: Communicate and Manage Any Project With A Single Sheet of Paper, 2nd Edition. January 2013. 256 p.

11. Cynthia Snyder Stackpole. A Project Manager's Book of Forms: A Companion to the PMBOK Guide, 2nd Edition. March 2013. 240 p.

12. Harold R. Kerzner, Frank P. Saladis. Project Management Workbook and PMP / CAPM Exam Study Guide, 11th Edition. August 2013. 544 p.

13. Harold R. Kerzner. Project Management – Best Practices: Achieving Global Excellence, 3rd Edition. April 2014. 792 p.

REFERENCES:

1. Rodashchuk H. Yu., Kontseba S. M., Lishchuk R. I., Skurtol S. D. (2023). Merezheve planuvannia v upravlinni IT-proektamy [Network planning in IT project management]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk*. *Seriia: Tekhnichni nauky. – Taurian Scientific Bulletin. Series: Technical sciences*, 1, P. 42-56. [in Ukrainian].

2. Katrenko A. V. (2021). Upravlinnia IT-proektamy [Management of IT projects]. Lviv: «Novyi Svit-2000». 550 p. [in Ukrainian].

3. Dovhan L.Ie., Mokhonko H.A., Malyk I.P. (2017). Upravlinnia proektamy: navchalnyi posibnyk do vyvchennia dystsypliny dlia mahistriv haluzi znan 07 «Upravlinnia ta administruvannia» spetsialnosti 073 «Menedzhment» [Project management: a study guide for the study of the discipline for masters of the field of knowledge 07 "Management and administration" specialty 073 "Management"]. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho. 420 p. [in Ukrainian].

4. Smetaniuk O. A., Bondarchuk A. V. (2020). Osoblyvosti systemy upravlinnia proiektamy v IT-kompaniiakh [Peculiarities of the project management system in IT companies]. Ahrosvit. № 10. P. 105–111. [in Ukrainian].

5. Kuzminykh V. O., Taranenko R. A. Osnovy upravlinnia IT proektamy: navch. posib. dlia stud. spetsialnosti 122 «Kompiuterni nauky» [Basics of IT project management: teaching. manual for students specialty 122 "Computer science"]. Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2019. 75 p. [in Ukrainian].

6. Hvozd M.Ia., Zlydnyk Yu.O. (2018). AGILE – nova metodolohiia menedzhmentu: teoretychni aspekty [AGILE – a new management methodology: theoretical aspects]. *Elektronnyi zhurnal «Infrastruktura rynku» – Electronic magazine "Infrastructure of the market".* № 25. P. 230-234. [in Ukrainian].

7. Chukhlib V.Ie, Veduta L.L. (2018). Suchasni metody upravlinnia proektamy. [Modern methods of project management]. *Suchasni pidkhody do upravlinnia pidpryiemstvom – Modern approaches to enterprise management.* №. 3. P. 234-243. [in Ukrainian].

8. Nechvoloda L.V., Pylypenko K.V. (2018). Udoskonalennia kalendarnoho planuvannia vykonannia IT-proektu [Improvement of calendar planning of IT project implementation]. *Ekonomichnyi visnyk Donbasu – Economic Herald of Donbass*. No 1(51). P. 87-91. [in Ukrainian].

9. Peryt I. O. Perspektyvy vprovadzhennia Kanban v upravlinnia biznesom vitchyznianykh subiektiv hospodariuvannia [Prospects for implementing Kanban in business management of domestic economic entities.] *Biznes Inform – Business Inform*. 2019. № 8. P. 218-228. [in Ukrainian].

10. Clark A. Campbell, Mick Campbell (2013). The New One-Page Project Manager: Communicate and Manage Any Project With A Single Sheet of Paper, 2nd Edition. January. 256 p.

11. Cynthia Snyder Stackpole (2013). A Project Manager's Book of Forms: A Companion to the PMBOK Guide, 2nd Edition. March. 240 p.

12. Harold R. Kerzner, Frank P. Saladis (2013). Project Management Workbook and PMP / CAPM Exam Study Guide, 11th Edition. August. 544 p.

13. Harold R. Kerzner (2014). Project Management – Best Practices: Achieving Global Excellence, 3rd Edition. April. 792 p.

УДК 004.03
DOI https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-8

Владислав СІДАНЧЕНКО
аспірант кафедри безпеки інформації та телекомунікацій, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005, sidanchenko.vl.v@nmu.one
***ORCID:** 0000-0001-5581-9177*

Бібліографічний опис статті: Сіданченко, В. (2023). Перевірка характеру розподілу даних про хімічний склад чавуну на випуску. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security,* 3, 65–69, doi: https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-8

ПЕРЕВІРКА ХАРАКТЕРУ РОЗПОДІЛУ ДАНИХ ПРО ХІМІЧНИЙ СКЛАД ЧАВУНУ НА ВИПУСКУ

Вступ. *Забезпечення заданого хімічного складу чавуну на виробництві грає вирішальну роль у задачі визначення якості металургійної продукції і важливих економічних показників підприємства. Для досягнення цієї мети виникає необхідність розробки та впровадження ефективних методів прогнозування, які відіграють ключову роль оптимального управління процесом виплавки чавуну заданої якості.*

Складні технологічні процеси, такі як доменна плавка, піддаються впливу багатьох факторів різної природи. Ці фактори впливають як на загальний перебіг та розвиток процесу, так і на його окремі властивості та кількісні характеристики.

Методологія. *У процесі дослідження найбільша увага приділялася ключовим аспектам первинної обробки даних про хімічний склад чавуну та методам описової статистики. Головною метою описової статистики є надання інформації про досліджувані дані в компактній та зрозумілій формі. Однак, перш ніж перейти до опису доступних даних, необхідно проаналізувати їх тип і характер розподілу, оскільки різні типи даних вимагають різних методів опису та обробки. Це також буде корисним при виборі відповідного статистичного методу для перевірки гіпотез.*

Наукова новизна. *На даний момент дослідники не дійшли єдиної думки про те, яким законом розподілу описуються дані про хімічний склад чавуну на випуску, крім цього автору невідомі наукові публікації, які докладно розкривають цю тему. У зв'язку з чим виникає необхідність у проведенні дослідження стохастичних властивостей реальних даних про хімічний склад чавуну на випуску доменної печі.*

Ключові слова: *типи даних, закон розподілу, описова статистика, нестаціонарні процеси.*

Vladyslav SIDANCHENKO
Postgraduate Student of the Department of Information Security and Telecommunications, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho ave., Dnipro, Ukraine, 49005, sidanchenko.vl.v@nmu.one
***ORCID:** 0000-0001-5581-9177*

To cite this article: Sidanchenko, V. (2023). Perevirka kharakteru rozpodilu danykh pro khimichnyi sklad chavunu na vypusku [Examination of the data distribution nature on the chemical composition of cast iron at the output]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering, and Cyber Security,* 3, 65–69, doi: https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-8

EXAMINATION OF THE DATA DISTRIBUTION NATURE ON THE CHEMICAL COMPOSITION OF CAST IRON AT THE OUTPUT

Introduction. *Ensuring the desired chemical composition of cast iron in manufacturing plays a crucial role in determining the quality of metallurgical products and important economic indicators of an enterprise. To achieve this goal, there is a need for the development and implementation of effective forecasting methods that play a key role in the optimal management of the cast iron smelting process to a specified quality.*

Complex technological processes, such as blast furnace smelting, are influenced by various factors of different natures. These factors affect both the general course and development of the process, as well as its individual properties and quantitative characteristics.

Methodology. *In the course of the research, the primary focus was on the key aspects of data preprocessing and descriptive statistics methods. The main purpose of descriptive statistics is to provide information about the investigated data in a concise and understandable form. However, before proceeding to describe the available data, it is necessary to analyze their type and distribution, as different types of data require different methods*

of description and processing. This will also be useful when choosing an appropriate statistical method for hypothesis testing.

Scientific Novelty. *At present, researchers have not reached a consensus on the distribution law that describes the data on the chemical composition of cast iron at the output. In addition, the author is unaware of scientific publications that thoroughly cover this topic. Hence, there is a need for conducting a study of the stochastic properties of real data on the chemical composition of cast iron in the output of a blast furnace.*

Key words: *data types, distribution law, descriptive statistics, non-stationary processes.*

Аналіз попередніх досліджень. До характерних особливостей доменного виробництва належать:

– випадковий характер змін у часі фізичних та хімічних властивостей шихтових матеріалів;

– велика кількість чинників (зокрема неконтрольованих), які впливають на кінцевий результат доменної плавки.

Зазначені особливості зумовлюють необхідність проведення досліджень властивостей часових рядів, якими представлені результати хімічного аналізу чавуну на випуску. Такі дослідження необхідні для розробки рекомендацій зі створення методик прогнозування хімічного складу чавуну за умов діючого виробництва, адекватних характеру прогнозованого процесу (Гусєв, Сіданченко, 2022, с. 24-31).

Як правило, часовими рядами є випадкові зміни величин, що дозволяють послідовно уявити еволюцію складних систем на основі отриманих даних (Boffetta, Cencini, Falconi, Vulpiani, 2002, с. 367-374). Найчастіше статистичний аналіз ґрунтується на припущенні, що досліджувана система є випадковою, тобто причинний процес, що створив часовий ряд, має багато складових частин або ступенів свободи. Взаємодія цих компонентів настільки комплексна, що детерміноване пояснення неможливе. При цьому об'єктом дослідження є клас моделей, які, як правило, відповідають класу випадкового гаусівського процесу. Однак, багато реальних часових рядів характеризуються інваріантністю щодо масштабних перетворень (властивість самоподібності), у зв'язку з чим стандартна гаусова статистика виявляється неспроможною і проблема дослідження часових рядів зводиться до аналізу стохастичних самоподібних процесів, які можуть бути описані фрактальними множинами (Mandelbrot, 2002; Feder, 1988).

Основне дослідження. Перед тим як розпочинати роботу з даними, завжди слід проводити перевірку розподілу. Під видом розподілу розуміють функцію, яка зв'язує значення змінної випадкової величини з ймовірністю їх появи в сукупності.

У статистичних дослідженнях найчастіше проводиться перевірка розподілу на нормальність. Під нормальним розподілом розуміють симетричний розподіл дзвоноподібної форми, при якому близько 68% даних відрізняється від середнього арифметичного не більше ніж на одне, а приблизно 95% – не більше ніж на два стандартні відхилення в кожну сторону. Незважаючи на те, що нормальний (гаусовий) розподіл зустрічається дуже часто і відіграє важливу роль у статистиці, існують і інші розподілу даних (біноміальний, Пуассона, Максвелла, Шарльє, та ін). Для перевірки існують графічні методи та статистичні критерії.

Дане дослідження проводилося у програмному середовищі Matlab, на основі реальних даних про відсотковий вміст кремнію в чавуні, які були отримані в різні моменти часу, на доменній печі № 3 (ДП-3) Маріупольського металургійного комбінату ім. Ілліча (ММК) (Сіданченко, Нікольська, 2023, с. 77).

На першому етапі дослідження було проведено тест Колмогорова – Смирнова для досліджуваних часових рядів, з використанням функції "ksstat", ця функція використовується для обчислення значення статистики Колмогорова – Смирнова (KS-статистики) при порівнянні двох вибірок або однієї вибірки з теоретичним розподілом. Статистика KS демонструє, наскільки добре емпірична функція розподілу (ЕФР) вибірки відповідає теоретичній функції розподілу (ТФР). Отримані рівні значущості склали p = 0,00012 і p = 0,00004 для часових рядів 1 і 2, дозволяють відкинути гіпотезу про відповідність даних, закону нормального розподілу, оскільки критичне значення рівня значущості становить 0,05.

До аналогічного висновку можна дійти на підставі результату візуального аналізу гістограм (рис. 1), де помітні відхилення від нормального розподілу, що демонструється у таких аспектах як:

1. Асиметрія: У нормальному розподілі дані симетричні щодо середнього значення. Відхилення вліво або вправо від симетрії свідчить про асиметрію даних.

2. Викиди: Відхилення від нормального розподілу проявляється у вигляді викидів – значень, які сильно відрізняються від інших у наборі даних.

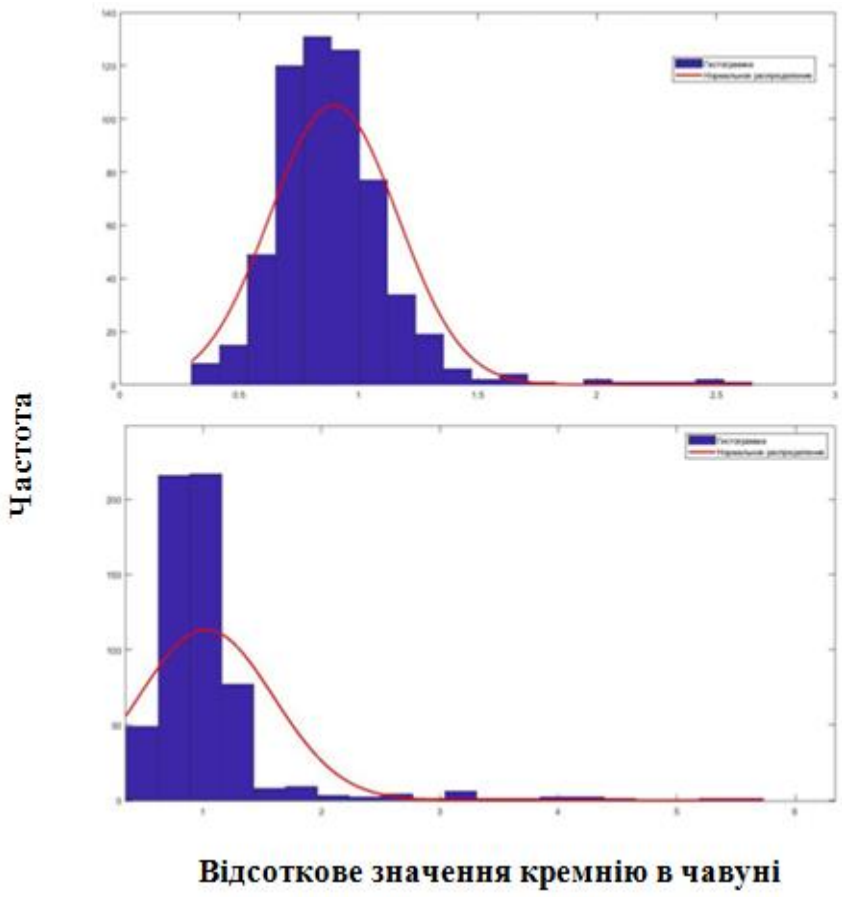


Рис. 1. Гістограми розподілу даних

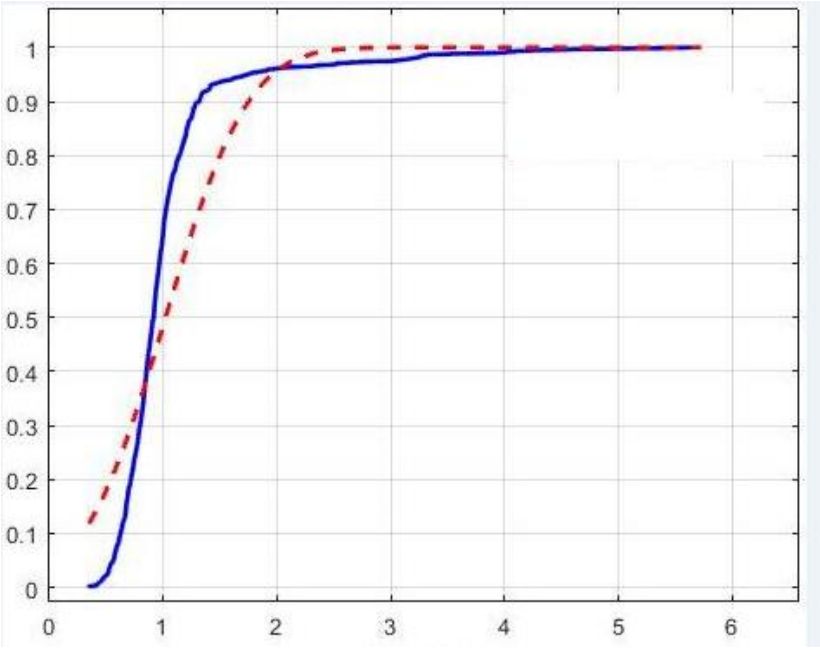


Рис. 2. Порівняння емпіричної функції розподілу та теоретичної функції розподілу

Крім того, з візуального аналізу графіків емпіричної функції розподілу (ЕФР – синя лінія) та теоретичної функції розподілу (ТФР – червона пунктирна лінія) (рис. 2), помітна їх суттєва відмінність, що так само може вказувати на відхилення даних від нормального розподілу.

Незважаючи на те, що гістограма є добрим способом перевірки нормальності розподілу, більш чітку картину дають квантильні діаграми (рис. 3). У випадку нормального розподілу даних квантильна діаграма має вигляд прямої лінії. Будь-яке відхилення від прямої лінії свідчить про відхилення даних від нормальності.

З отриманих квантильних діаграм чітко видно істотне відхилення від лінії нормального розподілу (червона пунктирна лінія).

Висновки. Узагальнюючи отримані нетривіальні результати дослідження стохастичних властивостей часових рядів, якими представленні результати хімічного аналізу чавуну на випуску можна зробити наступні висновки:

1. Експериментально підтверджено, що класична гіпотеза про нормальний (гаусівський) розподіл даних хімічного аналізу чавуну на випуску може вважатися необґрунтованою.

2. Аналізуючи отримані результати дослідження, можна дійти висновку про необґрунтованість класичних методів оцінки і прогнозу хімічного складу чавуну, які не можуть дати необхідного за своєю точністю результату,

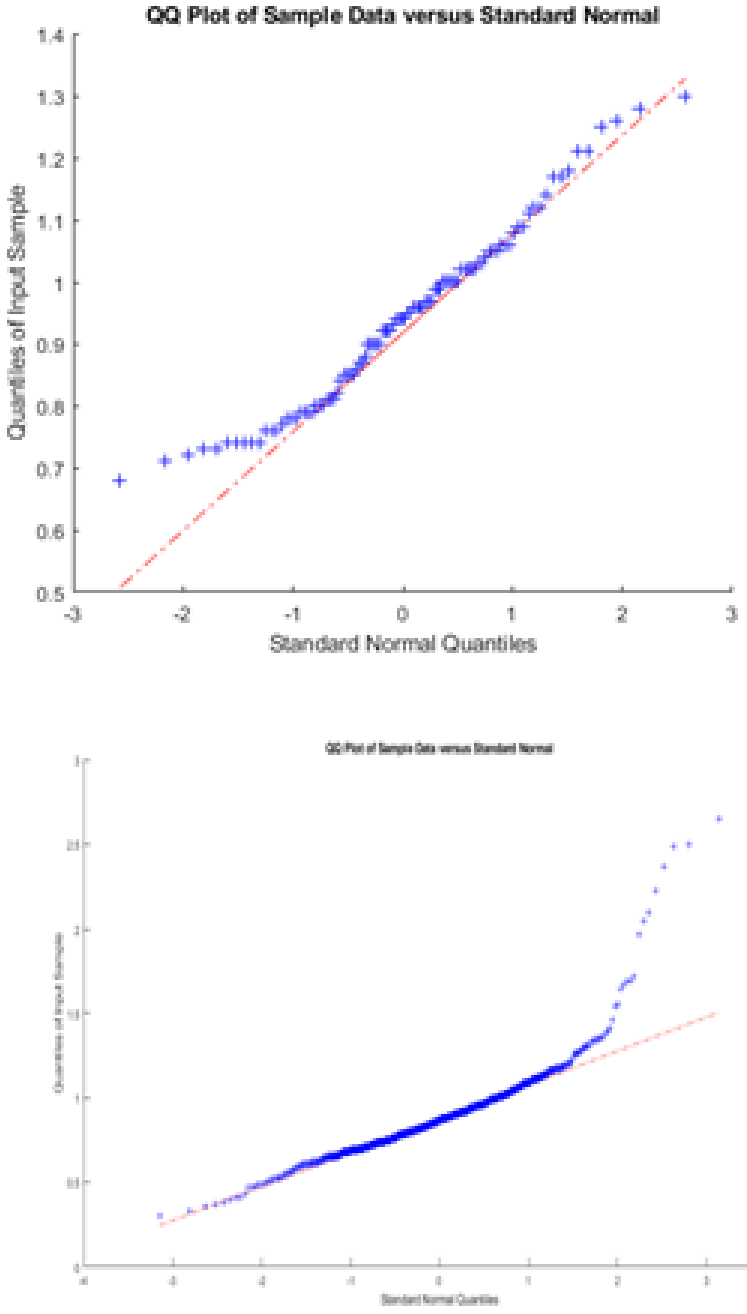


Рис. 3. Квантильні діаграми досліджуваних часових рядів

оскільки більшість із них, як згадувалося раніше, ґрунтуються на припущенні, що об'єктом дослідження є клас моделей, які відповідають класу випадкового (гаусівського) процесу.

3. Точні відомості про характер розподілу даних є важливим для вибору відповідних статистичних методів та моделей для подальшого аналізу. Оскільки дані не відповідають нормальному характеру розподілу, виникає необхідність альтернативного підходу до аналізу даних, з цілю побудови прогнозних моделей адекватних характеру досліджуваного процесу.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Гусєв О.Ю., Сіданченко В.В. Фрактальний аналіз реальних даних про хімічний склад чавуну на випуску доменної печі. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security.* 2022. №. 2. С. 24-31.

2. Boffetta G., Cencini M., Falconi M., Vulpiani A. Predictability: a way to characterize complexity // *Phys. Rep*. 2002. V. 356. P. 367-374.

3. Mandelbrot B. (2002). Fractal geometry of nature. *The institute of Computer Research.*

4. J. Feder. (1988). Fractals. Plenum Press*, New York.*

5. Сіданченко В.В., Нікольська О.І. Методи нелінійної динаміки в задачі прогнозування хімічного складу чавуну на випуску. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security.* 2023. №. 2. С. 76-83.

REFERENCES:

1. Gusev O.Yu., Sidanchenko V.V. (2022). Fraktalnyi analiz realnykh danykh pro khimichnyi sklad chavunu na vypusku domennoi pechi. [Fractal analysis of real data on the chemical compositionof cast iron at the output of a blast furnace]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security.* №. 2. P. 24-31 [in Ukrainian].

2. Boffetta G., Cencini M., Falconi M., Vulpiani A. (2002). Predictability: a way to characterize complexity // *Phys.Rep*. V. 356. P. 367-374.

3.Mandelbrot B. (2002). Fractal geometry of nature. *The institute of Computer Research.*

4. J. Feder. (1988). *Fractals*. *Plenum Press, New York.*

5. Sidanchenko V.V., Nikolska O.I. (2023). Metody neliniinoi dynamiky v zadachi prohnozuvannia khimichnoho skladu chavunu na vypusku. [Methods of non-linear dynamics in the problem of forecasting the chemical composition of cast iron at the output]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security.* №. 2. P. 76-83 [in Ukrainian].

УДК 004.02
DOI https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-9

Дмитро ЯНОВСЬКИЙ
аспірант, Державний університет «Житомирська політехніка», вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, 10005, yanovsky.dmitry@gmail.com
***ORCID:** 0000-0003-0558-3914*

Марина ГРАФ
доктор філософії з комп'ютерних наук, завідувач кафедри комп'ютерних наук, Державний університет «Житомирська політехніка», вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, 10005, graf.maryna@gmail.com
***ORCID:** 0000-0003-4873-548X*
***Scopus Author ID:** 57202440773*

Бібліографічний опис статті: Яновський, Д., Граф, М. (2023). Аналіз існуючих методів прогнозування попиту та способів оцінки їх якості. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security,* 3, 70–77, doi: https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-9

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОПИТУ ТА СПОСОБІВ ОЦІНКИ ЇХ ЯКОСТІ

У даному тексті було досліджено різні методи прогнозування попиту, зокрема евристичні, екстраполяційні, регресійні та методи машинного навчання. Евристичні методи базуються на суб'єктивних оцінках експертів та можуть бути використані для довгострокового та середньострокового прогнозування, а також в умовах нестабільності. Однак вони мають свої недоліки, такі як суб'єктивність та можливість зміщення прогнозу.

Математичні методи екстраполяції та регресії ґрунтуються на статистичних тенденціях та дозволяють прогнозувати майбутні значення на основі минулих даних. Вони мають просту реалізацію і зрозумілу інтерпретацію результатів, але також обмежені недостовірністю даних та неможливістю передбачити нестабільні умови в майбутньому.

Машинне навчання представляє альтернативний підхід до прогнозування, використовуючи великий обсяг даних. Воно включає алгоритми керованого навчання, неконтрольованого навчання та глибокого навчання, кожен з яких має свої особливості і застосовується для різних типів завдань. Підкреслюється, що регресійні моделі та методи машинного навчання мають свої переваги, такі як здатність враховувати багато змінних і факторів, але також мають складність в реалізації та інтерпретації результатів прогнозу.

В тексті розглянуто основні способи розрахунку похибки прогнозування та шкалу оцінки якості прогнозування в залежності від значення похибки. Наголошується, розрахунок цих показників передбачає лінійний розвиток подій, тоді як нелінійні події можуть впливати на точність прогнозу. Наприклад, збої в роботі постачальника або магазину можуть призводити до збільшення похибки прогнозу. Таким чином, необхідно враховувати нелінійний характер подій при оцінці точності прогнозу

Отже, вибір методу прогнозування залежить від конкретної ситуації та доступності даних. Кожен метод має свої переваги та обмеження, і їх використання повинно бути обґрунтоване і здійснюватись з урахуванням особливостей конкретного прогнозувального завдання.

***Ключові слова:** методи прогнозування; екстраполяція; регресія; машинне навчання; якість прогнозу; похибка прогнозу.*

Dmytro YANOVSKY
Postgraduate Student, Zhytomyr Polytechnic State University, 103 Chudnivska str., Zhytomyr, 10005, yanovsky.dmitry@gmail.com
***ORCID:** 0000-0003-0558-3914*

Maryna GRAF
Doctor of Philosophy in Computer Sciences, Head of the Department of Computer Sciences of the Zhytomyr Polytechnic State University, 103 Chudnivska str., Zhytomyr, 10005, graf.maryna@gmail.com
***ORCID:** 0000-0003-4873-548X*
***Scopus Author ID:** 57202440773*

To cite this article: Yanovsky, D., Graf, M. (2023). Analiz isnuiuchykh metodiv prohnozuvannia popytu ta sposobiv otsinky yikh yakosti [Analysis of existing demand forecasting methods and methods of assessing their quality]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security,* 3, 70–77, doi: https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-9

ANALYSIS OF EXISTING METHODS OF FORECASTING DEMAND AND METHODS OF ASSESSING THEIR QUALITY

This text explored various demand forecasting methods, including heuristic, extrapolation, regression, and machine learning methods. Heuristic methods are based on subjective assessments of experts and can be used for long- and medium-term forecasting, as well as in conditions of instability. However, they have their drawbacks, such as subjectivity and the possibility of biasing the forecast.

Mathematical methods of extrapolation and regression are based on statistical trends and allow predicting future values based on past data. They have a simple implementation and a clear interpretation of the results, but are also limited by the unreliability of the data and the inability to predict unstable conditions in the future.

Machine learning represents an alternative approach to forecasting using large amounts of data. It includes supervised learning, unsupervised learning and deep learning algorithms, each of which has its own characteristics and is used for different types of tasks. It is emphasized that regression models and machine learning methods have their advantages, such as the ability to take into account many variables and factors, but also have difficulty in implementing and interpreting forecast results.

The text discusses the main methods of calculating the forecasting error and the scale for assessing the quality of forecasting depending on the value of the error. It is emphasized that the calculation of these indicators assumes a linear development of events, while non-linear events can affect the accuracy of the forecast. For example, disruptions in the work of a supplier or store can lead to an increase in the forecast error. Thus, it is necessary to take into account the non-linear nature of events when assessing the accuracy of the forecast

Therefore, the choice of forecasting method depends on the specific situation and the availability of data. Each method has its advantages and limitations, and their use should be justified and carried out taking into account the specifics of a specific forecasting task.

Key words: *forecasting methods; extrapolation; regression; machine learning; forecast quality; forecast error.*

Актуальність теми. Прогнозування попиту є важливою складовою управління бізнесом в будь-якій галузі економіки. Актуальність прогнозування попиту полягає в тому, що це дозволяє підприємствам та організаціям здійснювати більш обґрунтоване планування виробництва, закупівель, маркетингової стратегії та інших аспектів діяльності.

Також прогнозування попиту дозволяє підприємствам завчасно адаптуватися до змін на ринку, враховувати фактори, які впливають на попит, такі як зміна технологій, демографічні зміни, економічні тенденції та інші.

Прогнозування попиту також дозволяє встановлювати оптимальні ціни на продукцію, що підвищує ймовірність продажу та збільшує прибуток. Важливо зазначити, що високоякісний прогноз попиту дозволяє підприємствам конкурувати на ринку та забезпечувати задоволення потреб клієнтів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори.

Питанням прогнозування економічного розвитку регіону присвячена значна увага в роботах вітчизняних і зарубіжних вчених економістів. Цими проблемами займались, зокрема, Гаркуша Н.М. (Гаркуша, 2012, с. 438-579), Юрченко М.Є. (Юрченко, 2018, с. 6-75), Гече Ф.Е., Мулеса О.Ю., Гриненко В.В., Смоланка В.Ю. (Гече, Мулеса, Гриненко, Смоланка, 2019, с. 132-144), Вітинський П. Б., Ткаченко Р. О. (Вітинський, Ткаченко, 2019, с. 147–150) та інші. Їхні праці є основою для розробки і реалізації нових напрямів і гнучких методик щодо моделювання економічного розвитку на основі ефективних методів прогнозування. Наприклад, Гече Ф. Е., Мулеса О. Ю., Гриненко В.В., Смоланка В. Ю. запропонували новий алгоритм вибору факторних ознак, який базується на властивостях частинних коефіцієнтів кореляції, Гаркуша Н.М. описала теоретичні основи прийняття управлінських рішень, методи і моделі їх розробки, Вітинський П. Б., Ткаченко Р. О. розробили нейроподібну систему обчислювального інтелекту для підвищення точності розв'язання задач прогнозування в умовах коротких вибірок даних.

Аналізуючи наукові доробки з теми дослідження, можна говорити про активне застосування методів прогнозування попиту як у вітчизняному, так і у світовому суспільстві особливо в контексті автоматизації використання цих методів. Зважаючи на збільшення можливостей і потужності обчислювальної техніки методи прогнозування стають все складнішими та охоплюють все більші об’єми даних.

Метою статті є проведення аналізу найбільш вживаних методів прогнозування попиту та методів оцінки їх якості.

Викладення основного матеріалу. Прогнозування – це процес наукового обґрунтування можливих кількісних та якісних змін його стану в майбутньому, а також альтернативних способів досягнення очікуваного стану (Макаренко, 2014, с. 23-25). Основні принципи, на яких базується прогнозування наведені на рис. 1 (Гаркуша, 2012, с. 499-503):

За цими принципами здійснюється формування прогнозів майбутнього стану того чи іншого суб'єкта господарювання.

В цілому методи прогнозування поділяють за ступенем формалізації (математичні, евристичні) та загальними принципами дії і способу отримання інформаційних даних (рис. 2) (Макаренко, 2014; Mescon, 1988).

Евристичні методи. Евристичні методи прогнозування є суб'єктивним, такими, що засновані на судженнях експертів і осіб, що приймають рішення, або навіть на інтуїції (Терещенко, 2003, с. 467-500). Як правило, ці методи застосовуються в наступних випадках:

– для довгострокового та середньострокового прогнозування. У такій перспективі дуже ймовірні зміни попиту, які не носять чисто інерційного характеру, але можуть відображати істотну зміну кон'юнктури на конкретному ринку збуту (макроекономічні зміни, зміна структури ринку, значне посилення або ослаблення важ-

Рис. 1. Базові принципи прогнозування

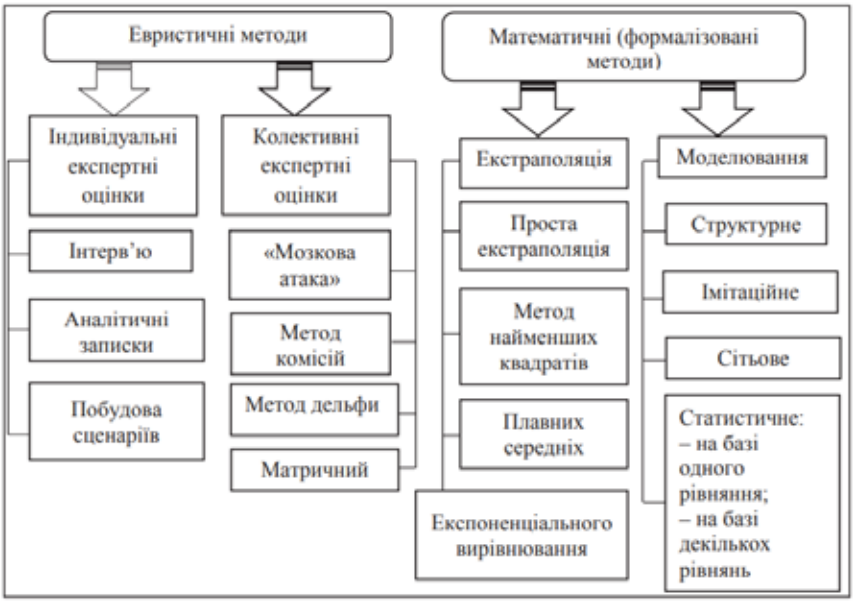


Рис. 2. Схема класифікації методів прогнозування за ступенем формалізації і загальними принципами дії та способу отримання інформаційних даних

ливих учасників ринку і т.д.). При довгостроковому прогнозуванні необхідно спиратися на поведінкові дані, отримані при проведенні маркетингових досліджень;

– для прогнозування попиту на нові товари, які не мають аналогів, що унеможливлює використання методу історичної аналогії;

– профілі попиту і зв'язку нестабільні;

– є необхідність спиратися на думку керівників або експертів з суб'єктивних причин;

– коли немає можливості навіть для короткострокового прогнозування застосувати кількісні методи (наприклад, коли немає обсягу вихідних даних, необхідних для застосування кількісних методів, або коли прогноз повинен бути отриманий дуже швидко, і немає часу на виконання необхідного кількісного аналізу).

Евристичні методи мають певні недоліки, які необхідно усвідомлювати при їх застосуванні (Терещенко, 2003, с. 467-500):

– в силу суб'єктивності прогнозу велика ймовірність зміщення прогнозу, тобто його систематичного відхилення від факту в ту чи іншу сторону;

– як правило, неповна документація – рідко коли отримання прогнозу таким способом супроводжується докладними поясненнями експертів про те, чому вони вибрали саме такий прогноз, а не інший;

– вони не практичні, коли необхідно підготувати прогноз попиту на сотні, а то й тисячі номенклатурних найменувань продукції – людина не в змозі оперувати такими обсягами інформації;

– Існує небезпека домінування однієї точки зору над іншими (наприклад, погляд наукового керівника або провідного визнаного експерта) при консолідації думок експертів (наприклад, при застосуванні методу консенсусної панелі), і не факт, що ця домінуюча точка зору буде ближче до істини.

Математичні методи можна розділити на дві підгрупи: екстраполяція і регресія.

Екстраполяція. Методи екстраполяції (засновані на поширенні спостережуваної тенденції в майбутнє) засновані на декількох важливих припущеннях (Чубукова, 2014, с. 130-150):

– у часовому ряді існує статистично значуща тенденція;

– досліджуваний процес є інерційним, тобто закономірності, що існували в минулому, зберігатимуться й у майбутньому;

– фактори, що визначають розвиток процесу, залишаються незмінними.

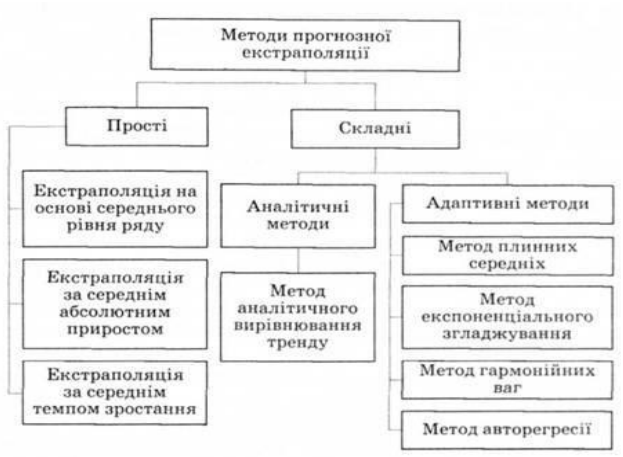


Рис. 3. Групування методів екстраполяції

Залежно від особливостей зміни рівнів у рядах динаміки методи екстраполяції можуть бути простими і складними (Гаркуша, 2012, с. 499-515).

Перевагами методів екстраполяції є проста реалізація та зрозуміла інтерпретація результатів. До недоліків можна віднести неможливість всіх факторів, низька достовірність даних при довгостроковому прогнозі, та неможливість передбачити результат при нестабільності, мінливості умов у майбутньому (Бутакова, 2011, с. 100-112).

Методи регресії. Методи регресії засновані на побудові причинно-наслідкових зв'язків між величиною попиту і факторами, які на нього впливають. Фактори можуть носити як демографічний, так і економічний характер. Для застосування регресійних методів необхідні ряди даних достатньої довжини, причому як дані про попит, так і дані про фактори, що впливають на попит. Для розрахунку прогнозних значень попиту будується регресійна модель, яка пов'язує фактори і результативну ознаку (Smeekes, Wijler, 2018; Alvarez-Diaz, 2010).

Можна сказати, що ці способи є найбільш складними і дорогими, оскільки вимагають збору і обробки не тільки внутрішньої, але і зовнішньої інформації для компанії на регулярній основі. Побудова регресійної моделі вимагає декількох етапів (Гече, 2019, с. 132-144):

1) Вибір незалежної змінної (фактор-аргументу).

2) Оброблення статистичної інформації.

3) Встановлення міри залежності між результуючими змінними (ознаками) і факторними змінними (показниками).

4) Визначення найвпливовіших факторних ознак для результуючого показнику.

5) Побудова рівняння регресії відносно найвпливовіших факторних ознак і перевірка його на адекватність.

6) Аналіз кореляційної моделі.

При побудові лінійних регресійних моделей, як правило, до факторних ознак ставляться наступні вимоги (Гече, 2019, с. 132-144):

– факторні змінні повинні мати кількісне вимірювання (валовий прибуток, чистий прибуток, матеріальні витрати, амортизація тощо);

– факторні ознаки мають бути лінійно незалежними;

– їх значення визначаються за даними поточної та оперативної звітності (квартальні, річні звіти, диспетчерські документи тощо).

Методи регресії вимагають великої кількості вхідної інформації і чималих навичок в її статистичній обробці. Тому зазвичай ці методи використовуються в бізнесі, коли прогноз, отриманий більш простими і дешевими методами, не дає якості, яке влаштовує компанію.

Машинне навчання. Для подолання проблеми складності побудови регресійних моделей було розроблено різні технології інтелектуального аналізу даних, що дозволяють виймати корисні знання із баз даних. Ці технології об’єдналися в окремий мультидисциплінарний напрямок й отримали назву машинне навчання (machine learning – ML). Особливістю методів машинного навчання є не прямий розв’язок задачі, а навчання на множині подібних прикладів, що дозволяє використовувати ці методи для обробки великих обсягів даних та виявляти в них нові, нетривіальні, корисні та доступні для інтерпретації знання (Кононова, 2020, с. 8-14).

В машинному навчанні розрізняють види алгоритмів (Suthaharan, 2016, с. 237-305):

1. Алгоритми керованого навчання. Є найпоширенішим видом алгоритмів машинного навчання. Вони широко використовуються для прогнозування майбутніх результатів і класифікації даних. До прикладів алгоритмів керованого навчання відносяться лінійна регресія, дерева рішень, Random Forest та опорні векторні машини. Основна перевага цього типу навчання полягає в тому, що воно дозволяє точно прогнозувати та класифікувати дані, проте для його успішної роботи потрібна значна кількість позначених навчальних даних.

2. Алгоритми неконтрольованого навчання – використовуються для виявлення шаблонів і груп даних без міток. Зазвичай їх використовують для кластеризації, зменшення розмірності і виявлення аномалій. Серед таких алгоритмів можна виділити кластеризацію методом k-середніх, ієрархічну кластеризацію та виявлення аномалій. Основною перевагою неконтрольованого навчання є те, що воно не вимагає наявності міток або великого обсягу навчальних даних, які потрібні для контрольованого навчання. Однак результати можуть бути складні для інтерпретації.

3. Алгоритми глибокого навчання – використовують штучні нейронні мережі для розв'язання складних завдань, таких як розпізнавання зображень, обробка природної мови та автономне водіння. Прикладами алгоритмів глибокого навчання є згорткові нейронні мережі, рекурентні нейронні мережі та мережі довготривалої короткочасної пам'яті. Основною перевагою глибокого навчання є здатність до вирішення складних завдань з високою точністю. Проте, для досягнення успіху цей підхід вимагає великих обсягів даних і може бути витратним з точки зору обчислень.

Отже, до переваг регресійних моделей та машинного навчання можна віднести можливість врахування великої кількості змінних та факторів та встановлення тісноти зв’язку між ними. Недоліками є складність в реалізації та складність інтерпретування результатів прогнозу.

Оцінка результатів роботи методів прогнозування. Для оцінки результатів роботи методів прогнозування, а також для порівняння результатів роботи методів між собою використовують похибку прогнозу і точність прогнозування. Ці показники є оберненими, тобто точність прогнозування це 100% мінус похибка прогнозу (Бутакова, 2010, с. 150-153). Нижче будуть розглянуті методи обчислення похибки прогнозу.

Найпростішим показником похибки прогнозу є відхилення факту від прогнозу в кількісному вираженні.

На практиці розраховують похибку прогнозування для кожної окремої позиції, а також розраховують середню похибку прогнозування. Наведені нижче загальні показники помилок стосуються саме середніх помилок прогнозування.

До них відносяться (Юрченко, 2018, с. 18-23):

MAPE – середній відсоток абсолютної похибки

$$MAPE = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{n}\frac{\left|Z(t) - \hat{Z}(t)\right|}{Z(t)} * 100\% \qquad (1)$$

де $Z(t)$ – фактичне значення часового ряду, а $\hat{Z}(t)$ – прогнозне значення.

Ця оцінка застосовується до часових рядів, фактичні значення яких набагато більше 1.

Наприклад, оцінки похибки прогнозування потужності майже у всіх статтях вказані як значення MAPE.

Якщо фактичні значення часового ряду близькі до 0, то в знаменнику з'явиться дуже маленьке число, яке зробить значення MAPE близьким до нескінченності – це не зовсім правильно. Для рядів, які містять значення близькі до нуля, застосовується наступна оцінка помилок прогнозування.

MAE – середня абсолютна похибка

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{n}\left|Z(t) - \hat{Z}(t)\right| \qquad (2)$$

Крім цих методів, іноді використовуються і інші оцінки похибок, які менш популярні, але також застосовні.

ME – Середня помилка

$$ME = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{n}\left(Z(t) - \hat{Z}(t)\right) \qquad (3)$$

Є й інша назва цього показника – Bias (англ. – зміщення) демонструє величину відхилення, а також в яку сторону прогноз продажів відхиляється від фактичної потреби. Цей показник показує, оптимістичний чи песимістичний прогноз. Тобто негативне значення зміщення свідчить про те, що прогноз був завищений (реальна потреба була нижче), і, навпаки, позитивне значення того, що прогноз був занижений. Числове значення показника визначає величину відхилення (зміщення).

MSE – помилка RMS

$$MSE = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{n}\left(Z(t) - \hat{Z}(t)\right)^2 \qquad (4)$$

RMSE – квадратний корінь середньоквадратичної похибки кореня

$$RMSE = \sqrt{MSE} \qquad (5)$$

SD – стандартне відхилення

$$SD = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{n}\left(\hat{Z}(t) - ME\right)^2 \qquad (5)$$

де ME – середня похибка, визначена за формулою вище.

Чим менше значення цих величин, тим вища якість прогнозу. На практиці ці характеристики використовують досить часто. Даний підхід дає якісні результати, якщо на періоді прогнозу не виникають принципово нові закономірності. На підставі критеріїв MAPE та RMSE можна дійти висновку стосовно загального рівня похибки моделі шляхом їх порівняння. Цей рівень наведений у табл. 1 (Гаркуша, 2012. с. 540-542).

Таблиця 1

Похибка прогнозу в залежності від MAPE, RMSPE

MAPE, RMSE	Точність прогнозу
Менше 10%	Висока
10–20%	Добра
20–50%	Задовільна
Більше 50%	Незадовільна

Вадою обговорених вище характеристик точності прогнозів є їх залежність від обраних одиниць виміру. Було б корисним указати безрозмірний показник, аналогічний до коефіцієнта кореляції. Одним з таких показників є коефіцієнт невідповідності Тейла, чисельником якого є середньоквадратична похибка прогнозу, а знаменник дорівнює квадратному кореню з середнього квадрата фактичних та оцінних значень (Кондіус, 2018):

$$U = \frac{\sqrt{\sum\left(\hat{Z}(t) - Z(t)\right)^2 / n}}{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n} Z(t)^2} + \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n} \hat{Z}(t)^2}} \qquad (6)$$

Перевага коефіцієнта Тейла полягає в тому, що його значення завжди знаходяться в межах від нуля до одиниці. Якщо всі прогнози є абсолютно точними, то значення коефіцієнта Тейла (U) буде дорівнювати нулю. Якщо всі прогнози дорівнюють нулю, а жодне з фактичних значень не дорівнює нулю, або навпаки, U буде дорівнювати одиниці. Таким чином, низьке значення U свідчить про точність прогнозу, але максимальне значення не існує. Значення, яке дорівнює одиниці, відповідає ситуації, коли всі прогнозні значення дорівнюють нулю, що є непрактичним при прогнозуванні номінальних величин. Однак, в розгляді змін такий прогноз відповідає моделі "без змін". Значення більше одиниці вказують на те, що прогноз є гіршим, ніж прогноз "без змін".

По суті, основним завданням роботи будь якого алгоритму прогнозу є отримання результатів мінімальною похибкою прогнозу. Але, як видно з описаних вище формул, їх використання передбачає лінійний розвиток подій: розрахунок прогнозу, створення замовлення на основі прогнозу, виконання замовлення постачальником вчасно і в повному обсязі, вчасне виставлення товару на полку магазину, відсутність збоїв в роботі самого магазину й т.ін. Але, якщо події розвиваються нелінійно, наприклад, постачальник не виконає замовлення вчасно, або товар не буде виставлений на полку, тоді по товару будуть відсутні фактичні продажі, що призведе до збільшення похибки прогнозу

й зменшення його точності. Таким чином, нелінійні події напряму впливають на результат розрахунку показників якості прогнозу, але при цьому підхід до розрахунку показників передбачає тільки лінійний розвиток подій.

Висновки та перспективи подальших досліджень. В результаті дослідження було проведено аналіз публікації існуючих методів прогнозування попиту та способів оцінки їх якості. Була описана класифікація методів прогнозування, принципи роботи евристичних методів, екстраполяції та методів регресії, розглянуті види алгоритмів машинного навчання та проаналізовані переваги та недоліки різних методів прогнозування попиту.

Також були описані показники, при допомозі яких оцінюється якість прогнозу. Був зазначений вплив нелінійних подій на результат розрахунку показників якості прогнозу, який приводить до неоднозначності трактування цих показників. В наступних роботах пропонується дослідити види нелінійних подій, та методи обчислення ступеню їх впливу.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Гаркуша Н.М., Цуканова О.В., Горошанська О.О. Моделі і методи прийняття рішень в аналізі та аудиті: навч. посібник. 2-ге вид., К.: Знання, 2012. С. 591.

2. Юрченко М.Є. Прогнозування та аналіз часових рядів. Методичні вказівки до практичних занять та самостійної роботи студентів спеціальності 051 «Економіка» освітня програма «Економічна кібернетика», «Економічна аналітика». Чернігів: ЧНТУ, 2018. С. 88.

3. Гече Ф.Е., Мулеса О.Ю., Гриненко В.В., Смоланка В.Ю. Знаходження найвпливовіших факторних ознак при побудові лінійних регресійних моделей. Technology Audit and Production Reserves, 3(2(47), 2019. P. 20–25. URL: https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.175020

4. Вітинський П.Б., Ткаченко Р.О. Нейроподібна структура для задач прогнозування в умовах коротких вибірок даних. *Науковий* вісник НЛТУ України, т. 29, No. 5, 2019. С. 147–150.

5. Макаренко М.В., Гудкова В.П., Аджавенко М.М., Приймук О.Р., Творонович В.І. Економічне прогнозування: навч. посібник. К.: ДЕТУТ, 2014. С. 161.

6. Mescon M.H., Albert M., Khedouri F. Management. Harpercollins College Div, 1988. P. 777.

7. Терещенко О.О. Фінансова діяльність суб'єктів господарювання: навч. посібник. К.: КНЕУ, 2003. С. 554.

8. Чубукова О.Ю., Рубан В.Я., Антошкіна Л.І. Економічна кібернетика: підручник. За заг. ред. д-ра екон. наук, проф. О.Ю. Чубукової. Донецьк: ЮгоВосток, 2014. С. 454.

9. Бутакова М.М. Економічне прогнозування: методи і прийоми практичних розрахунків: навчальний посібник. 2-е вид., випр. М.: КНОРУС, 2010. С. 168.

10. Smeekes S., Wijler E. Macroeconomic forecasting using penalized regression methods. International Journal of Forecasting, 34 (3), 2018. P. 408–430. URL: https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2018.01.001

11. Alvarez-Diaz M., Alvarez A. Forecasting exchange rates using local regression. Applied Economics Letters, 17 (5), 2010. P. 509–514. URL: https://doi.org/10.1080/13504850801987217

12. Кононова К.Ю. Машинне навчання: методи та моделі: підручник для бакалаврів, магістрів та докторів філософії спеціальності 051 «Економіка». Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2020. С. 301.

13. Suthaharan S. Machine Learning Models and Algorithms for Big Data Classification: Thinking with Examples for Effective Learning. Springer, 2016. P. 556.

14. Кондіус І.С. Електронний посібник з дисципліни: Фінансове прогнозування. Луцький національний технічний університет, Луцьк, 2018. С. 160.

REFERENCES:

1. Harkusha, N. M., Tsukanova, O. V., & Horoshanska, O. O. (2012). Modeli i metody pryiniattia rishen v analizi ta audyti: navch. posibnyk (2-he vyd.) [Models and methods of decision-making in analysis and audit: a study guide (2nd edition)]. Kyiv: Znannia [in Ukrainian].

2. Yurchenko, M. Ye. (2018). Prohnozuvannia ta analiz chasovykh riadiv. Metodychni vkazivky do praktychnykh zaniat ta samostiinoi roboty studentiv spetsialnosti 051 «Ekonomika» osvitnia prohrama «Ekonomichna kibernetyka», «Ekonomichna analityka» [Time series forecasting and analysis. Methodical instructions for practical classes and independent work of students of specialty 051 «Economics» educational program «Economic cybernetics», «Economic analytics»]. Chernihiv: ChNTU [in Ukrainian].

3. Heche, F. E., Mulesa, O. Yu., Hrynenko, V. V., & Smolanka, V. Yu. (2019). Znakhodzhennia naivplyvovishykh faktornykh oznak pry pobudovi liniinykh rehresiinykh modelei [Finding the most influential factors when building

linear regression models]. Technology Audit and Production Reserves, 3(2(47)), 20-25 DOI:10.15587/2312-8372.2019.175020 [in Ukrainian].

4. Vitynskyi, P. B., & Tkachenko, R. O. (2019). Neiropodibna struktura dlia zadach prohnozuvannia v umovakh korotkykh vybirok danykh [A neural-like structure for forecasting problems in conditions of short data samples]. Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy. – Scientific bulletin of NLTU of Ukraine, 29(5), 147-150 [in Ukrainian].

5. Makarenko, M. V., Hudkova, V. P., Adzhavenko, M. M., Pryimuk, O. R., & Tvoronovych, V. I. (2014). Ekonomichne prohnozuvannia: navch. Posibnyk [Economic forecasting: a study guide]. Kyiv: DETUT [in Ukrainian].

6. Mescon, M. H., Albert, M., & Khedouri, F. (1988). Management. Harpercollins College Div.

7. Tereshchenko, O. O. (2003). Finansova diialnist subiektiv hospodariuvannia: navch. posibnyk [Financial activity of business entities: study guide]. Kyiv: KNEU [in Ukrainian].

8. Chubukova, O. Yu., Ruban, V. Ya., & Antoshkina, L. I. (Red.). (2014). Ekonomichna kibernetyka: pidruchnyk [Economic cybernetics: a textbook]. Donetsk: YuhoVostok [in Ukrainian].

9. Butakova, M. M. (2010). Ekonomichne prohnozuvannia: metody i pryiomy praktychnykh rozrakhunkiv: navchalnyi posibnyk (2-e vyd., vypr.) [Economic forecasting: methods and techniques of practical calculations: study guide. 2nd ed., ed]. M: KNORUS [in Ukrainian].

10. Smeekes, S., & Wijler, E. (2018). Macroeconomic forecasting using penalized regression methods. International Journal of Forecasting, 34(3), 408-430. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2018.01.001

11. Alvarez-Diaz, M., & Alvarez, A. (2010). Forecasting exchange rates using local regression. Applied Economics Letters, 17(5), 509-514. DOI:10.1080/13504850801987217

12. Kononova, K. Yu. (2020). Mashynne navchannia: metody ta modeli: pidruchnyk dlia bakalavriv, mahistriv ta doktoriv filosofii spetsialnosti 051 «Ekonomika» [Machine learning: methods and models: a textbook for bachelors, masters and doctors of philosophy, specialty 051 «Economics»]. Kharkiv: KhNU imeni V. N. Karazina. – Kharkiv: V.N. Karazin KhNU [in Ukrainian].

13. Suthaharan, S. (2016). Machine Learning Models and Algorithms for Big Data Classification: Thinking with Examples for Effective Learning. Springer.

14. Kondius, I. S. (2018). Elektronnyi posibnyk z dystsypliny: Finansove prohnozuvannia [Electronic manual for the discipline: Financial forecasting.]. Lutskyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet. – Lutsk National Technical University [in Ukrainian].

ЗМІСТ

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGY: COMPUTER SCIENCE, SOFTWARE ENGINEERING AND CYBER SECURITY

Випуск 3

Коректура • Ірина Миколаївна Чудеснова

Комп'ютерна верстка • Наталія Сергіївна Кузнєцова

Підписано до друку: 27.11.2023. Формат 60x84/8. Гарнітура Arial.
Папір офсет. Цифровий друк. Ум. друк. арк. 9,30. Замов. № 0124/024. Наклад 300 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1
Телефон +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 7623 від 22.06.2022 р.