

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Максимов Антон Євгенійович

УДК [004.89:519.816]:[005.8:004](043.3)

ДИСЕРТАЦІЯ

**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДЛЯ РОЗВ’ЯЗАННЯ ЗАДАЧ
БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В УМОВАХ РИЗИКУ,
НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ТА НЕЧІТКОЇ ІНФОРМАЦІЇ**

122 – Комп’ютерні науки

12 – Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень.

Використання ідей, результатів і текстів інших авторів

мають посилання на відповідне джерело

_____ А. Є. Максимов

Науковий керівник Триус Юрій Васильович, кандидат фізико-математичних наук,
доктор педагогічних наук, професор

АНОТАЦІЯ

Максимов А. Є. Інформаційна технологія для розв'язання задач багатокритеріального прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки (12 Інформаційні технології). Черкаський державний технологічний університет, Міністерство освіти і науки України, Черкаси, 2025.

У дисертаційному дослідженні вирішена актуальна науково-прикладна задача, що полягає в удосконаленні існуючих та розробці нових моделей, методів та інформаційних засобів, які дозволять підвищити ефективність прийняття рішень в умовах багатокритеріальності, ризику, невизначеності та нечіткої інформації.

Для формалізації завдань дослідження проведено аналіз предметної області наукового дослідження, що передбачає вивчення існуючих підходів до багатокритеріального прийняття рішень, виявлення їх переваг та обмежень, аналіз сучасного стану проблематики прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації. Розглянуто теоретичні відомості щодо інформаційних технологій підтримки прийняття рішень та їх призначення. Наведено постановку задачі прийняття рішень та задачі багатокритеріального прийняття рішень. Розглянуто основні етапи прийняття рішень, надано загальну схему прийняття рішень. Розглянуто різні види інформаційних систем, що допомагають ОПР приймати обґрунтовані та ефективні рішення, зокрема: системи підтримки прийняття рішень (DSS); системи підтримки групового прийняття рішень (GDSS); інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень (IDSS); системи автоматизованого прийняття рішень (ADMS); інформаційні системи управління (MIS); експертні системи (ES).

Надано класифікацію систем підтримки прийняття рішень за різними ознаками, зокрема: за ступенем автоматизації; за рівнем управління; за технологічною основою; за методами обробки інформації; на рівні користувача; на

технічному рівні; на концептуальному рівні; за наявністю інтелектуального компонента.

Наведено класичну структуру СППР та структуру веб-орієнтованої СППР з її можливими компонентами, виділено недоліки цих структур. Запропоновано сучасну структуру веб-орієнтованої системи підтримки прийняття рішень, наведено опис її компонентів та особливості їх взаємодії для забезпечення інтерактивної підтримки процесу прийняття рішень. Сучасна структура веб-орієнтованої системи підтримки прийняття рішень забезпечує масштабування, відмовостійкість, ефективне використання ресурсів та гнучкість системи.

Розглянуто загальну схему та моделі створення веб-орієнтованих інформаційних технологій підтримки прийняття рішень. Визначено етапи створення та впровадження СППР. Проведено огляд деяких існуючих веб-орієнтованих ресурсів підтримки прийняття рішень, здійснено аналіз їх переваг та недоліків.

Наведено теоретичні відомості щодо інформаційних ситуацій прийняття рішень, зокрема проаналізовано та систематизовано інформаційні ситуації прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації.

Показано, що задачі прийняття рішень в інформаційних ситуаціях ризику, невизначеності та нечіткої інформації з формальної точки зору є частинними випадками загальної задачі багатокритеріального прийняття рішень.

Розроблено концептуальну модель R-U-F можливих інформаційних ситуацій прийняття рішень, яка відображає взаємозв'язок між основними типами складних інформаційних ситуацій, що виникають під час багатокритеріального прийняття рішень: інформаційною ситуацією прийняття рішень в умовах ризику (Risk, R), інформаційною ситуацією прийняття рішень в умовах повної невизначеності (Uncertainty, U) та інформаційною ситуацією прийняття рішень в умовах нечіткої інформації (Fuzzy, F). Визначено ключові особливості цієї моделі серед яких: універсальність, гнучкість, інтегративність.

Розроблено модель процесу прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації, що відповідає запропонованій концептуальній R-U-F-моделі можливих інформаційних ситуацій прийняття

рішень і передбачає можливість вибору кількох методів прийняття рішень як традиційних, так і модифікованих, комбінованих та гібридних методів для розв'язання поставленої задачі з подальшим агрегуванням одержаних результатів.

Удосконалено модель управління ризиками проєкту (Project Risk Management Model) за рахунок введення додаткових компонент серед яких: вхідна інформація про наявні ризики проєкту, рівні ризиків, критерії оцінювання ризиків, експертні оцінки для кожного ризику за заданими критеріями; процедура визначення належності ризиків проєкту до певного рівня ризиків, процедуру визначення пріоритетів ризиків проєкту за допомогою методу аналізу ієрархій; вихідна інформація про належність ризиків проєкту до відповідних рівнів ризиків; вектор пріоритетів ризиків проєкту і вектор їх рангів; реєстр ризиків з переліком заходів щодо запобігання та усунення ризиків проєкту.

Визначено основні характеристики традиційних, модифікованих, комбінованих та гібридних методів прийняття рішень, наведено їх переваги та недоліки.

Проаналізовано популярні методи розв'язання задачі багатокритеріального прийняття рішень (MCDM). Проведено порівняння двох підходів до багатокритеріального прийняття рішень: багатоцільового прийняття рішень (Multi-Objective Decision Making, MODM) і багатокритеріального аналізу альтернатив (Multi-Attribute Decision Making, MADM). Наведено опис популярних методів MADM та зроблено їх розподіл щодо можливості застосування в інформаційних ситуаціях в умовах визначеності, невизначеності, ризику та нечіткої інформації. Проведено порівняльний аналіз характеристик деяких популярних методів MADM, зокрема: AHP, ANP, TOPSIS, MOORA, методів прийняття рішень в умовах ризику, методів прийняття рішень в умовах повної невизначеності.

Одержали подальшого розвитку деякі методи прийняття рішень для розв'язання задач багатокритеріального прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації.

Розроблено метод визначення рівнів ризиків та їх пріоритетів, який є комбінацією модифікованого методу матриці ризиків і методу аналізу ієрархій.

Запропонований комбінований метод надає можливість з високою точністю оцінювати ризики за більш широкою шкалою і більшою кількістю критеріїв, ніж традиційний метод матриці ризиків. Поєднання модифікованого методу матриці ризиків, де вхідні дані формуються на основі експертних оцінок (суб'єктивно), з методом аналізу ієрархій, де заповнення матриць парних порівнянь альтернатив (ризиків) за критеріями і визначення пріоритетів ризиків здійснюється автоматично на основі математичних розрахунків (об'єктивно), надає користувачам більш широкі можливості для аналізу ризиків проєктів у порівнянні з іншими методами.

Розроблено комбінований метод для класифікації задач тайм-менеджменту, що поєднує в собі метод аналізу ієрархії та метод матриці Ейзенхауера. Показано, що задачу тайм-менеджменту можна класифікувати як задачу багатокритеріального прийняття рішень. За допомогою цього методу користувачу надається можливість оцінювати задачі як альтернативи за критеріями, які відповідають класифікації задач у матриці Ейзенхауера. У результаті чого отримується розбиття вхідних задач на чотири класи матриці Ейзенхауера, а також визначаються пріоритети для задач кожного класу в числовому еквіваленті.

Розроблено модифікований метод Fuzzy TOPSIS для вибору ефективної альтернативи в задачі багатокритеріального прийняття рішень за рахунок модифікації процедури обчислення коефіцієнту близькості до нечіткого позитивного ідеального розв'язку (FPIS) та нечіткого негативного ідеального розв'язку (FNIS) шляхом застосування різних метрик, зокрема евклідової метрики, мангеттенської метрики, метрик Чебишова, Мінковського і Геммінга, а також використання результатів групової експертизи. Запропонований модифікований метод надає можливість визначити які метрики дають схожі, або відмінні результати. За цим підходом можна проаналізувати чи є відхилення значущими, або вони знаходяться в межах допустимої похибки. Ця процедура дозволяє більш точно оцінювати відстані між нечіткими ідеальним та антиідеальним рішеннями, враховуючи оцінки групи експертів.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

1. Розроблено методику застосування декількох методів прийняття рішень в межах однієї задачі з агрегуванням результатів за різними підходами до визначення вагових коефіцієнтів методів, зокрема: за допомогою експертного оцінювання; з використанням процедури парних порівняння методу аналізу ієрархій; з використанням середнього геометричного для випадку рівної важливості методів;

2. Розроблено методику для порівняння результатів застосування методів прийняття рішень TOPSIS, FTOPSIS та їх модифікацій, одержаних за допомогою різних метрик для оцінювання коефіцієнту близькості до нечіткого позитивного ідеального розв'язку (FPIS) та нечіткого негативного ідеального розв'язку (FNIS);

3. Створено модулі веб-орієнтованої СППР, що реалізують розроблені моделі та методи багатокритеріального прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації, а також забезпечують інтерактивну роботу користувача і дозволяють ефективно застосовувати розроблену інформаційну технологію на практиці.

Результатом дослідження є моделі, методи та веб-орієнтована інформаційна технологія для розв'язання задач багатокритеріального прийняття рішень, що забезпечують комплексну оцінку альтернатив і підвищують ефективність процесу прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації.

Впровадження розроблених моделей, методів і програмного забезпечення сприяло підвищенню результативності роботи компаній, що дозволило знизити витрати часу та фінансових ресурсів на розробку проєктів за рахунок більш об'єктивного, обґрунтованого і оперативного прийняття рішень.

Практичне значення одержаних результатів підтверджується їх впровадженням у процес прийняття рішень різних компаній, а також використанням матеріалів дисертаційного дослідження в освітньому процесі Черкаського державного технологічного університету при підготовці майбутніх фахівців у галузі інформаційних технологій.

Ключові слова: інформаційні технології, інформаційна система, система підтримки прийняття рішень, прийняття рішень, математичні моделі, багатокритеріальні методи прийняття рішень, аналіз альтернатив, ризик,

управління ризиками, управління проєктами, ІТ-проєкти, невизначеність, нечітка інформація, нечіткі множини, експертне оцінювання.

ABSTRACT

Maksymov A. Information technology for solving multi-criteria decision-making problems under conditions of risk, uncertainty and fuzzy information. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 122 Computer Science (12 Information Technology). Cherkasy State Technological University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Cherkasy, 2025.

The dissertation research solves a relevant scientific and applied problem, which consists in improving existing and developing new models, methods and information tools that will increase the efficiency of decision-making in conditions of multi-criteria, risk, uncertainty and fuzzy information.

To formalize the research tasks, an analysis of the subject area of scientific research was conducted, which involves studying existing approaches to multi-criteria decision-making, identifying their advantages and limitations, and analyzing the current state of the problem of decision-making under conditions of risk, uncertainty, and fuzzy information. Theoretical information on information technologies for decision-making support and their purpose was considered. The formulation of the decision-making problem and the problem of multi-criteria decision-making were presented. The main stages of decision-making were considered, and a general decision-making scheme was provided. Various types of information systems that help DM make informed and effective decisions were considered, in particular: decision support systems (DSS); group decision-making support systems (GDSS); intelligent decision-making support systems (IDSS); automated decision-making systems (ADMS); management information systems (MIS); expert systems (ES).

A classification of decision support systems is provided according to various criteria, in particular: by the degree of automation; by the level of management; by the

technological basis; by the methods of information processing; at the user level; at the technical level; at the conceptual level; by the presence of an intellectual component.

The classical DSS structure and the structure of a web-based DSS with its possible components are presented, the disadvantages of these structures are highlighted. The modern structure of a web-based decision support system is proposed, its components are described and the features of their interaction are given to ensure interactive support of the decision-making process. The modern structure of a web-based decision support system provides scalability, fault tolerance, efficient use of resources and flexibility of the system.

The general scheme and models of creating web-based information technologies for decision support are considered. The stages of creating and implementing DSS are determined. A review of some existing web-based decision support resources is conducted, and their advantages and disadvantages are analyzed.

Theoretical information on information situations of decision-making is presented, in particular, information situations of decision-making under conditions of risk, uncertainty, and fuzzy information are analyzed and systematized.

It is shown that decision-making problems in information situations of risk, uncertainty, and fuzzy information are, from a formal point of view, special cases of the general problem of multi-criteria decision-making.

A conceptual model R-U-F of possible information situations for decision-making has been developed, which reflects the relationship between the main types of complex information situations that arise during multi-criteria decision-making: information situation for decision-making under risk (Risk, R), information situation for decision-making under complete uncertainty (Uncertainty, U), and information situation for decision-making under fuzzy information (Fuzzy, F). Key features of this model have been identified, including: universality, flexibility, and integrativity.

A model of the decision-making process under conditions of risk, uncertainty, and fuzzy information has been developed, which corresponds to the proposed conceptual R-U-F model of possible information situations for decision-making and provides for the possibility of choosing several decision-making methods, both traditional and modified,

combined and hybrid methods, to solve the problem with subsequent aggregation of the results obtained.

The Project Risk Management Model (PRRM) has been improved by introducing additional components, including: input information on existing project risks, risk levels, risk assessment criteria, expert assessments for each risk according to specified criteria; a procedure for determining whether project risks belong to a certain risk level, a procedure for determining project risk priorities using the Analytic Hierarchy Process; input information on whether project risks belong to the corresponding risk levels; a vector of project risk priorities and a vector of their ranks; a risk register with a list of measures to prevent and eliminate project risks.

The main characteristics of traditional, modified, combined and hybrid decision-making methods are identified, and their advantages and disadvantages are presented.

Popular methods for solving the problem of Multi-Criteria Decision Making (MCDM) are analyzed. Two approaches to multi-criteria decision-making are compared: Multi-Objective Decision Making (MODM) and Multi-Attribute Decision Making (MADM). Popular MADM methods are described and their distribution is made according to the possibility of application in information situations under conditions of certainty, uncertainty, risk and fuzzy information. A comparative analysis of the characteristics of some popular MADM methods is carried out, in particular: AHP, ANP, TOPSIS, MOORA; decision-making methods under risk; decision-making methods under conditions of complete uncertainty.

Some decision-making methods have been further developed to solve multi-criteria decision-making problems under conditions of risk, uncertainty, and fuzzy information.

A method for determining risk levels and their priorities has been developed, which is a combination of the modified risk matrix method and the Analytic Hierarchy Process. The proposed combined method provides an opportunity to assess risks with high accuracy on a wider scale and a larger number of criteria than the traditional risk matrix method. The combination of the modified risk matrix method, where input data is formed on the basis of expert assessments (subjectively), with the Analytic Hierarchy Process, where the filling of matrices of pairwise comparisons of alternatives (risks) by criteria

and the determination of risk priorities is carried out automatically on the basis of mathematical calculations (objectively), provides users with wider opportunities for analyzing project risks compared to other methods.

A combined method for classifying time management tasks has been developed, which combines the Analytic Hierarchy Process and the Eisenhower matrix method. It is shown that the time management task can be classified as a multi-criteria decision-making task. With the help of this method, the user is given the opportunity to evaluate tasks as alternatives according to criteria that correspond to the classification of tasks in the Eisenhower matrix. As a result, the input tasks are divided into four classes of the Eisenhower matrix, and the priorities for tasks of each class are determined in numerical equivalent.

A modified Fuzzy TOPSIS method has been developed to select an effective alternative in the problem of multi-criteria decision-making under fuzzy information conditions using various metrics, in particular: Euclidean metric, Manhattan metric, Chebyshev, Minkowski and Hamming metrics, as well as using the results of group expertise. The proposed modified method makes it possible to determine which metrics give similar or different results. This approach allows us to analyze whether the deviations are significant or within the acceptable error range. This procedure allows us to more accurately estimate the distances between the fuzzy ideal and anti-ideal solutions, taking into account the estimates of a group of experts.

The practical significance of the results obtained is that:

1. A methodology has been developed for applying multiple decision-making methods within a single task, with aggregation of the results based on different approaches to determining the weighting coefficients of the methods, including: expert evaluation; the pairwise comparison procedure of the Analytic Hierarchy Process; and the geometric mean for the case of equal importance of the methods;
2. A methodology has been developed to compare the results of applying the decision-making methods TOPSIS, FTOPSIS and their modifications, obtained using different metrics for evaluating the closeness coefficient to a fuzzy positive ideal solution (FPIS) and a fuzzy negative ideal solution (FNIS);

3. Web-based DSS modules have been created that implement the developed models and methods of multi-criteria decision-making under conditions of risk, uncertainty, and fuzzy information, as well as provide interactive user work and allow for the effective application of the developed information technology in practice.

The result of the research is models, methods, and web-based information technology for solving multi-criteria decision-making problems, which provide a comprehensive assessment of alternatives and increase the efficiency of the decision-making process under conditions of risk, uncertainty, and fuzzy information.

The implementation of the developed models, methods, and software contributed to increasing the efficiency of companies, which allowed reducing the cost of time and financial resources for project development due to more objective, well-founded, and operational decision-making.

The practical significance of the results obtained is confirmed by their implementation in the decision-making process of various companies, as well as the use of dissertation research materials in the educational process of Cherkasy State Technological University in the training of future specialists in the field of information technologies.

Keywords: information technology, information system, decision support system, decision making, mathematical models, multi-criteria decision-making methods, analysis of alternatives, risk, risk management, project management, IT projects, uncertainty, fuzzy information, fuzzy sets, expert assessment.

Список опублікованих праць за темою дисертації:

- *статті у іноземних виданнях, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Anton Maksymov, Yurii Tryus. Combined Method of Solving Time Management Tasks and Its Implementation in the Decision Support System. *Information Technology for Education, Science, and Technics Proceedings of ITEST 2022*. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. Vol. 178. Springer.

2023. pp. 131-146. (0,87 д. а.). ISSN 2367-4512 ISSN 2367-4520 (electronic). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-35467-0_9. Scopus, Web of Science.

Особистий внесок автора полягає у розробленні нового комбінованого методу розв'язання задачі тайм-менеджменту, що поєднує в собі метод аналізу ієрархії та метод матриці Ейзенхауера, а також створенні відповідного модуля веб-орієнтованої системи підтримки прийняття рішень та становить 0,65 друк. арк.

2. Maksymov, A., Tryus, Y. (2024). Information Technology for Determining Risk Levels and Their Priorities in Project Management. In: Faure, E., et al. *Information Technology for Education, Science, and Technics. ITEST 2024. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol 222. Springer, Cham. 2024. pp. 89-107. (1,24 д. а.). ISSN 2367-4512 ISSN 2367-4520 (electronic). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-71804-5_7. Scopus, Web of Science.

Особистий внесок автора полягає у розробленні моделі управління ризиками проекту (Project Risk Management Model), нового методу визначення рівнів ризиків та їх пріоритетів, який є комбінацією модифікованого методу матриці ризиків і методу аналізу ієрархій, а також створенні відповідного модуля веб-орієнтованої системи підтримки прийняття рішень та становить 0,93 друк. арк.

– **статті у наукових фахових виданнях України, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

3. Максимов, А. (2025). Аналіз стандартів управління ризиками та їх використання в ІТ-проектах. *Управління розвитком складних систем*, (61), С. 66–75. Київ: КНУБА. (1,1 д. а.). ISSN 2219-5300. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2025.61.66-75>. Фахове видання категорії Б.

4. Maksymov, A., & Tryus, Yu. (2025). Information technology for solving the multi-criteria decision-making problem using the modified Fuzzy TOPSIS method. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*, 30(1), pp. 91-106. (1,27 д. а.). ISSN 2306-4412 ISSN 2708-6070 (electronic). DOI: <https://doi.org/10.62660/bcstu/1.2025.91>. Фахове видання категорії Б.

Особистий внесок автора полягає у розробленні модифікованого методу Fuzzy TOPSIS для вибору ефективної альтернативи в задачі багатокритеріального прийняття рішень на основі різних метрик і використання результатів групової експертизи; розробленні методики порівняння результатів, одержаних різними методами за різними метриками для обчислення коефіцієнту близькості до нечіткого позитивного ідеального розв'язку (FPIS) та нечіткого негативного ідеального розв'язку (FNIS) та становить 0,95 друк. арк.

– наукові праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. Максимов А. Є. Web-орієнтований ресурс для класифікації задач до матриці Ейзенхауера за методом аналізу ієрархій. *Тези доповідей VI Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології в освіті, науці і техніці» (ІТОНТ-2022)*, (Черкаси, 23-25 червня 2022 р.) [Електронний ресурс]. Черкаси : ЧДТУ, 2022. С. 41-44. (0,21 д. а.). DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15540361>.

6. Єфімов В. В., Оксамитна Л. П., Максимов А. Є., Триус Ю. В. Веб-орієнтований ресурс для проведення групової експертизи методами прийняття рішень. *Тези доповідей VI Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології в освіті, науці і техніці» (ІТОНТ-2022)*, (Черкаси, 23-25 червня 2022 р.) [Електронний ресурс]. Черкаси : ЧДТУ, 2022. С. 37-40. (0,23 д. а.). DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15540361>.

Особистий внесок автора полягає у проведеному огляді і аналізі деяких існуючих веб-ресурсів для прийняття рішень та становить 0,02 друк. арк.

7. Юрій Триус, Антон Максимов, Віктор Єфімов. Задачі, методи та інформаційні технології прийняття рішень у медичному менеджменті. *Актуальні задачі медичної, біологічної фізики та інформатики*. Матеріали доповідей та виступів всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю 27 квітня 2022 року. Вінниця: Едельвейс. С. 60-65. (0,53 д. а.). ISBN 978-617-7237-95-1 (електронне видання) URL: https://dspace.vnmu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/5660/Матеріали%20конференції_Актуальні%20задачі%20медичної%20біологічної%20фізики%20та%20інформатики_27.04.2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Особистий внесок автора полягає у проведеному аналізі веб-ресурсів, що надають можливість розв'язувати задачі прийняття рішень в онлайн-режимі та становить 0,05 друк. арк.

8. Максимов А.Є. Комбінований метод управління ризиками проекту та його реалізація в системі підтримки прийняття рішень. *Тези доповідей IX Міжнародної науково-практичної конференції з проблем вищої освіти і науки «Інформаційні технології в освіті, науці і виробництві (ІТОНВ-2023) (25-26 травня 2023 року).* Луцьк: відділ іміджу та промоції ЛНТУ, 2023. С. 246-250. (0,16 д. а.). URL: https://itonv.lntu.edu.ua/files/2023/zbirnyk_itonv-2023.pdf.

9. Максимов А.Є. Інформаційна технологія застосування методу TOPSIS для задач пошуку проектів для ІТ-компанії. *Збірник тез доповідей II Міжнар. наук.-практич. конфер. «Інновації та перспективні шляхи розвитку інформаційних технологій» (06 груд. 2023 р., м. Черкаси) [Електронний ресурс] / упоряд. : Т. О. Прокопенко, Я. В. Тарасенко ; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. Черкаси : ЧДТУ, 2023. С. 73-75. (0,11 д. а.). URL: https://drive.google.com/file/d/1f0cc_HaFDH4G3AI_NfwqfTjaMjyWBvkc/view.*

10. Максимов А.Є., Триус Ю.В. Інформаційна технологія визначення рівнів ризиків та їх пріоритетів в управлінні проектами. *Тези доповідей VII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології в освіті, науці і техніці» (ІТОНТ-2024), (Черкаси, 23-24 травня 2024 р.) [Електронний ресурс]. Черкаси : ЧДТУ, 2024. С. 111-114. (0,28 д. а.). DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14766662>.*

Особистий внесок автора полягає у побудові моделі управління ризиками проекту (Project Risk Management Model) та розробці методу для аналізу ризиків проекту, який є комбінацією модифікованого методу матриці ризиків та методу аналізу ієрархій; розробленні веб-орієнтованого модуля системи підтримки прийняття рішень, що забезпечує автоматизацію процесу розподілу ризиків за критеріями важливості, визначення пріоритетів ризиків та їх ранжування, візуалізацію результатів аналізу ризиків, а також генерацію реєстру ризиків з рекомендаціями щодо їх запобігання та усунення та становить 0,21 друк. арк.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	18
ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ...	32
1.1 Задача та основні етапи прийняття рішень.....	32
1.2 Класифікація систем підтримки прийняття рішень.....	37
1.3 Веб-орієнтовані системи підтримки прийняття рішень.....	43
1.4 Постановка задачі дослідження.....	51
1.5 Висновки до розділу 1.....	54
Список використаних джерел до розділу 1.....	55
РОЗДІЛ 2 ІНФОРМАЦІЙНІ СИТУАЦІЇ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В УМОВАХ РИЗИКУ, НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ТА НЕЧІТКОЇ ІНФОРМАЦІЇ	61
2.1 Інформаційні ситуації прийняття рішень	61
2.2 Загальна постановка задачі багатокритеріального прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації.....	67
2.3 Концептуальна модель прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації.....	70
2.4 Методи розв'язання задачі багатокритеріального прийняття рішень....	81
2.5 Методика застосування декількох методів багатокритеріального прийняття рішень в межах однієї задачі з агрегуванням результатів.....	87
2.6 Висновки до розділу 2.....	95
Список використаних джерел до розділу 2.....	96
РОЗДІЛ 3 ЗАДАЧА, МОДЕЛІ І МЕТОДИ УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ.....	100
3.1 Задача управління ризиками в процесах прийняття рішень.....	100
3.2 Аналіз засобів управління ризиками.....	103
3.3 Постановка задачі визначення рівнів ризиків	109
3.4 Модель управління ризиками в проєктах.....	114
3.5 Процедура парних порівнянь ризиків.....	121

3.6 Комбінований метод розв'язання задачі визначення рівнів ризиків та їх пріоритетів.....	123
3.7 Висновки до розділу 3.....	128
Список використаних джерел до розділу 3.....	130
РОЗДІЛ 4 ЗАДАЧІ, МОДЕЛІ І МЕТОДИ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В УМОВАХ РИЗИКУ, НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ТА НЕЧІТКОЇ ІНФОРМАЦІЇ.....	136
4.1 Задача прийняття рішень в умовах ризику і методи її розв'язання.....	136
4.2 Задача прийняття рішень в умовах невизначеності і методи її розв'язання.....	138
4.3 Задача тайм-менеджменту як задача багатокритеріального прийняття рішень в умовах невизначеності і методи її розв'язання.....	140
4.3.1 Постановка задачі тайм-менеджменту	143
4.3.2 Комбінований метод розв'язання задачі тайм-менеджменту.....	144
4.4 Задача і методи прийняття рішень в умовах нечіткої інформації.....	151
4.4.1 Постановка задачі прийняття рішень в умовах нечіткої інформації	151
4.4.2 Модифікований метод Fuzzy TOPSIS розв'язування задачі багатокритеріального прийняття рішень	154
4.5 Висновки до розділу 4.....	169
Список використаних джерел до розділу 4.....	172
РОЗДІЛ 5 ПРОЄКТУВАННЯ І РОЗРОБКА ВЕБ-ОРІЄНТОВАНОЇ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ТА ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ...	180
5.1 Концептуальне проєктування веб-орієнтованої СППР.....	180
5.2 Логічне проєктування веб-орієнтованої СППР.....	182
5.3 Засоби розробки веб-орієнтованої СППР.....	185
5.4 Модулі веб-орієнтованої СППР для розв'язання деяких задач багатокритеріального прийняття рішень.....	187
5.4.1 Модуль для розв'язання задачі визначення рівнів ризиків та їх пріоритетів комбінованим методом.....	187

5.4.2 Модуль для розв'язання задачі тайм-менеджменту комбінованим методом.....	193
5.4.3 Модуль для розв'язання задачі багатокритеріального прийняття рішень модифікованим методом Fuzzy TOPSIS	198
5.4.4 Модуль для розв'язання задачі багатокритеріального прийняття рішень декількома методами з агрегуванням результатів.....	208
5.5 Висновки до розділу 5.....	217
Список використаних джерел до розділу 5.....	219
ВИСНОВКИ.....	223
ДОДАТКИ.....	227
ДОДАТОК А Акти впровадження результатів роботи.....	228
ДОДАТОК Б Список опублікованих праць за темою дисертації.....	231
ДОДАТОК В Огляд веб-ресурсів для прийняття рішень.....	235
ДОДАТОК Г Огляд методів і програмних засобів управління ризиками.....	238
ДОДАТОК Д Засоби запобігання та усунення типових ризиків в ІТ-проектах...	242
ДОДАТОК Е Структура бази даних СППР «Decisioner».....	244
ДОДАТОК Ж Інструкція користувача веб-орієнтованої СППР «Decisioner»...	245

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Позначення	Розшифрування
ЗПР	– задача прийняття рішень;
ЗБПР	– задача багатокритеріального прийняття рішень;
ІТППР	– інформаційна технологія підтримки прийняття рішень;
СППР	– система підтримки прийняття рішень;
DSS	– decision support system;
ІТ	– інформаційні технології;
ІС	– інформаційна система;
ОПР	– особа, яка приймає рішення;
ППР	– підтримка прийняття рішень;
МПР	– метод прийняття рішень;
GDSS	– Group Decision Support System;
IDSS	– Intelligent Decision Support System;
ADMS	– Automated Decision-Making System;
MIS	– Management Information System;
ES	– Expert System;
СКП	– система керування повідомленнями;
БД	– база даних;
БЗ	– база знань;
СКБД	– система керування базами даних;
СКБМ	– система керування базами моделей;
UI	– User Interface;
MAI / АНР	– метод аналізу ієрархій / Analytic Hierarchy Process;
MAM / АНР	– метод аналітичних мереж / Analytic Network Process;
FAHP	– Fuzzy Analytic Hierarchy Process;
MOORA	– Multi-Objective Optimization Ratio Analysis;

TOPSIS	– Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution;
FTOPSIS	– Fuzzy Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution;
MODM	– Multi-Objective Decision Making;
MADM	– Multi-Attribute Decision Making;
ISO	– International Organization for Standardization;
NIST	– National Institute of Standards and Technology;
PMBOK	– Project Management Body of Knowledge;
PRMM	– Project Risk Management Model;
НЧ	– нечіткі числа;
PIS	– Positive Ideal Solution;
NIS	– Negative Ideal Solution;
FPIS	– Fuzzy Positive Ideal Solution;
FNIS	– Fuzzy Negative Ideal Solution;
ЛТ	– лінгвістичні терми;
IO / CI	– індекс однорідності / consistency index;
BO / CR	– відношення однорідності / consistency ratio.

ВСТУП

Актуальність теми.

У сучасних умовах стрімкого розвитку цифрових технологій та інформаційних систем, прийняття ефективних управлінських рішень стає дедалі складнішим завданням. Особливо це стосується ситуацій, пов'язаних з наявністю множини суперечливих критеріїв, високим рівнем ризику, невизначеності та нечіткості інформації. У таких умовах традиційні методи прийняття рішень часто виявляються недостатньо гнучкими або неефективними, що створює потребу у нових підходах та інструментах, здатних забезпечити підтримку багатокритеріального аналізу з урахуванням складних критеріїв.

Сучасні напрями розвитку теорії прийняття рішень, зокрема методи нечіткої логіки, теорії ймовірностей, відкривають нові можливості для розробки ефективних інформаційних технологій, що здатні враховувати як кількісні, так і якісні характеристики даних. Інтеграція таких підходів у єдину інформаційну технологію дозволяє значно підвищити якість рішень, що приймаються в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації.

Особливої актуальності набуває розробка інформаційних технологій прийняття рішень для галузей, де помилки у прийнятті рішень можуть мати серйозні економічні, соціальні або екологічні наслідки. Враховуючи це, тема дисертаційної роботи, яка спрямована на розробку інформаційної технології для розв'язання задач багатокритеріального прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації, є актуальною як з наукової, так і з практичної точки зору.

На сьогодні рівень конкурентоспроможності компанії значною мірою залежить від її здатності оперативно та обґрунтовано приймати управлінські рішення. У зв'язку з цим зростає потреба у впровадженні систем підтримки прийняття рішень (СППР) у діяльність підприємств. Використання таких систем є актуальним завданням, оскільки сприяє автоматизації та оптимізації діяльності підприємства, полегшує аналіз можливих варіантів дій і забезпечує обґрунтований вибір найкращих рішень за заданими критеріями.

Актуальність теми дослідження зумовлена потребою ефективного розв'язання задач багатокритеріального прийняття рішень, що виникають у різних сферах діяльності людини. У зв'язку з цим важливою проблемою є створення інформаційних технологій, які б надавали можливість користувачу обирати і застосовувати найбільш ефективні методи багатокритеріального прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації.

Актуальність задач багатокритеріального прийняття рішень полягає в тому, що в реальних умовах управління, планування та аналізу доводиться враховувати множину суперечливих критеріїв, які впливають на вибір найкращого рішення. Це особливо важливо у випадках, коли необхідно знаходити компроміс між різними показниками ефективності, такими як витрати, якість, ризику та стійкість системи.

Задача *управління ризиками* залишається актуальною завжди, оскільки ризики присутні в кожному проєкті. Тому подальше дослідження і розробка ефективних методів управління ризиками проєктів та створення сучасних технологій їх реалізації є актуальною науковою і практичною проблемою.

Управління ризиками є важливим аспектом успішної реалізації проєктів у сфері інформаційних технологій, оскільки ІТ-проєкти схильні до високого рівня невизначеності та складності. Недостатній рівень управління ризиками може призвести до суттєвих втрат, перевищення бюджету, затримок у термінах реалізації проєктів та зниження якості кінцевого продукту. У зв'язку з цим виникає потреба у застосуванні надійних стандартів, які б забезпечили ефективне виявлення, аналіз і моніторинг ризиків протягом усього життєвого циклу ІТ-проєкту.

У сучасних умовах глобальної економічної нестабільності перспективи будь-якого підприємця або підприємства залежать від вирішення двох головних питань: як запобігти потенційним загрозам та як ефективно управляти негативними наслідками невизначеності. В контексті аналізу ризиків, невизначеність розглядається як первинний фактор, у той час як ризик є вторинним фактором. Існує прямий зв'язок між рівнем невизначеності та рівнем ризику: зі зростанням невизначеності зростає й ризик. Проте обидва ці фактори відіграють ключову роль у підприємницькій діяльності. Основна відмінність між цими явищами полягає у

можливості їх вимірювання та оцінки: невизначеність вимірювати неможливо або вкрай складно, в той час як ризик можна оцінити. Більш важливою відмінністю між цими двома явищами є можливість впливу: ризиком, на відміну від невизначеності, яка не є об'єктивним явищем, можна, і потрібно управляти.

Управління ризиками включає в себе прогнозування перспектив розвитку діяльності підприємства, аналіз можливих відхилень від запланованих результатів і керування цими відхиленнями за допомогою вдосконалення бізнес-процесів та мінімізації негативних наслідків. Слід зауважити, що оскільки невизначеність є неодмінною частиною реальності, повне уникнення ризику неможливе. Отже, ризик завжди присутній, і прийняття рішень повинно базуватися на стратегії управління ризиками.

Сучасні темпи розвитку технологій, постійні зміни в природних та штучних екосистемах, зростання конкуренції на ринку послуг вимагають від компаній підсилення їх адаптивності до нових умов та здатності оперативно реагувати на зміни, зокрема при *ідентифікації* та *класифікації ризиків*, що виникають в управлінні проєктами. У цьому контексті адаптивність компанії залежить від професіоналізму менеджерів, які відповідають за управління ризиками та розробляють стратегії щодо зменшення їх впливу на проєкти.

У сучасному бізнесі ключову роль відіграють інформаційні технології, оскільки допомагають менеджерам різних рівнів автоматизувати процеси прийняття рішень, зокрема й в управлінні ризиками, шляхом збирання, аналізу та інтерпретації даних про реалізацію проєктів у різних умовах. Використання інформаційних технологій дозволяє ефективно ідентифікувати потенційні ризики, прогнозувати їх наслідки та приймати належні заходи для запобігання чи зменшення негативних наслідків цих ризиків. Крім того, використання інформаційних систем забезпечує ефективний обмін даними між різними підрозділами компанії, що сприяє швидкій комунікації та співпраці в управлінні ризиками. Зростаюча складність бізнес-середовища породжує необхідність постійного удосконалення методів управління ризиками. Цей процес передбачає розробку нових стратегій, використання передових технологій для аналізу даних та

вдосконалення співпраці між різними підрозділами компанії. Важливим аспектом також є постійне вдосконалення процесів реагування на виявлені ризики шляхом швидкого прийняття відповідних рішень для мінімізації їх негативних наслідків.

У сучасних умовах динамічних модернізаційних перетворень збільшується потреба у підвищенні адаптивності організації, швидкості реагування на зміни в *задачах тайм-менеджменту*, що необхідно вирішити, та їх відповідній класифікації за певними критеріями. В даному випадку адаптивність є важливим чинником конкурентоспроможності людини, яка планує графік своєї діяльності. Важливу роль при цьому відіграють інформаційні технології, при використанні яких з'являється можливість автоматизувати відповідні процеси прийняття рішень при розв'язуванні задач тайм-менеджменту як задач багатокритеріального прийняття рішень.

Питанням *багатокритеріального прийняття рішень* присвячені наукові праці зарубіжних дослідників: Zavadskas E. K., Turskis Z., Mardani A., Jusoh A., Kahraman S., Öztayşi B., Xu Z., Da Q., Gomes M.I., Martins N.C., Munier N. Також вивченню цих питань присвячені наукові праці таких вітчизняних науковців, як Ситник В. Ф., Волошин О. Ф., Мащенко С. О., Бідюк П. І., Гожий О. П., Коршевнік Л. О., Снитюк В. Є., Гнатієнко Г. М., Кігель В. Р., Ус С. А., Коряшкіна Л. С., Демиденко М. А.

Дослідження з питань *управління проєктами* представлені в працях таких вітчизняних науковців, як Бушуєв С. Д., Бушуєва Н. С., Данченко О. Б., Тесля Ю. М., Морозов В. В., Зачко О. Б., Прокопенко Т. О., Бедрій Д. С., Колеснікова К. В.

Упродовж останніх десятиліть *задача управління ризиками* привертає увагу практиків і науковців у сфері управління проєктами. Питанням розроблення та впровадження методів і технологій управління ризиками в практику діяльності організацій і підприємств присвячені праці таких вітчизняних та зарубіжних дослідників як Геєць В. М., Шарапов О. Д., Вітлінський В. В., Тесля Ю. М., Данченко О. Б., Бедрій Д. С., Бушуєв С. Д., Чумаченко І. В., Кононенко І. В., Дружинін Є. А., Тесленко П. О., Колеснікова К. В., Тригуба А. М., Зачко О. Б., Peter Bernstein, Nassim Nicholas Taleb, Gerd Gigerenzer, Robert S. Kaplan, Douglas W. Hubbard, Irving H. LaValle та Peter C. Fishburn, Paul Slovic.

Питанням *управління ризиками* також присвячені праці таких фахівців як Matsuda T., Karahan V., Aydoğmuş E., Canpolat E., Ruan X., Yin Z., Duan Y., Zhao J., Chen J., Bai G., Wen-Kai K. H., Show-Hui S. H., Wen-Jui T. У роботі Duijm D.J. представлено комплексний огляд методу матриць ризиків, що узгоджується з висновками попередніх досліджень Cox A. L., Jr., Flage R., Røed W.

Питанням розроблення та впровадження *методів тайм-менеджменту* в практику діяльності організацій і підприємств присвячені праці таких фахівців, як С. Кові, К. Бішоф, Р. Кійосакі, А. Гаст, П. Друкер, Л. Зайверт, Д. Коулі, К. Меллер, Т. Пітерс, Ф. Тейлор, Й. Кноблаух. Також можна виділити публікації останніх років, які присвячені проблемам побудови системного тайм-менеджменту від таких авторів як К. Гodefroy, Г. Кемпбелл, Р. Дейвіс, С. Гоупі.

Українськими науковцями проблеми тайм-менеджменту також активно досліджуються. Зокрема, Кендюхов О. В. і Ягельська К. Ю. дослідили економічний зміст часу і роль часового фактора у розвитку економічної системи. Євтушенко Г. І. та Дерев'янка В. М. дослідили основні причини втрат часу і надали пропозиції щодо підвищення ефективності застосування тайм-менеджменту. Петрушенко М. М. і Бондар Т. В. запропонували авторський підхід до впровадження корпоративної системи управління часовими ресурсами. Харук К. Б., Скриньковський Р. М., Крукевич Н. М. дослідили проблеми становлення поняття «тайм-менеджмент» і запропонували інструментарій діагностики тайм-менеджменту на засадах бізнес-індикаторів «ефективність» та «продуктивність». Писаревська Г. І. обґрунтувала методи інвентаризації часу. Ізюмцева Н. В. та Недождій В. В. розглянули етапи побудови системи тайм-менеджменту на підприємстві, а також обґрунтували необхідність здійснення моніторингу робочого часу. Макаренко С. М., Олійник Н. М. і Лущик К. І. надали рекомендації щодо вдосконалення управління часовими ресурсами та визначення оптимального навантаження для працівників.

Поєднання методу аналізу ієрархій (MAI) та матриці Ейзенхауера досліджувалося у працях зарубіжних вчених: Ngandam Mfondoum A.H., Tchindjang M., Mfondoum V., Makouet I., де розглядається формування допоміжних матриць

(sub-quadrants) для основної матриці Ейзенхауера за допомогою MAI. Науковцями Ap D., Sani A., M.Ak Y., Hindardjo A., Adrial A., Yuliza M., Khristiana Y., Husain T., Pasaman I., Barat P., Ekonomi I., Surakarta A. запропоновано інтеграцію MAI та SAW (англ. Simple Additive Weighting) у системі підтримки прийняття рішень на основі матриці Ейзенхауера з урахуванням індивідуальних критеріїв оцінювання задач. Також варто відзначити дослідження Rafke H.D., Lestari Y.D., у якому поєднано підхід BOCR із MAI та матрицею Ейзенхауера.

Останнім часом дослідниками широко використовується апарат нечіткої логіки для побудови моделей та методів багатокритеріального прийняття рішень.

Значний внесок у розвиток *нечітких методів* прийняття рішень зробили Dubois D., Prade H., Zadeh L.A., Chen C.T., Carlsson C., Herrera F., Mardani A. Останнім часом з'явилися нові дослідження з удосконалення нечітких MCDM-методів, зокрема Makki N., Han F. Варто відзначити українських науковців, дослідження яких спрямовані на застосування нечіткої логіки, серед яких Зайченко Ю. П., Згуровський М. З., Снитюк В. Є., Гнатієнко Г. М., Матвійчук А. В., Федоров Є. Є.

У науковій спільноті активно ведуться дослідження щодо модифікацій методу FTOPSIS. У роботі Kustiyahningsih Y., Rahmanita E., Khusnul Khotimah B., Purnama J. розглянуто застосування різних форм представлення нечітких оцінок у поєднанні з евклідовою метрикою. Порівняльний аналіз методів Fuzzy АНР та FTOPSIS проведено у дослідженні Rane N., Choudhary S., де також застосовано класичну евклідову метрику. У роботі Yin H., Li X., Gao Y. було запропоновано модифікацію евклідової відстані – відносну евклідову відстань – для коректнішого порівняння нечітких альтернатив.

Практичне застосування FTOPSIS із використанням евклідової метрики продемонстровано у роботі Han F., Alkhawaji R., Shafieezadeh M. У дослідженні Talukdar P., Dutta P. порівнюються шість різних метрик в рамках класичного TOPSIS. У свою чергу, Shyur H.-J., Shih H.-S. дослідили вплив вибору метрики на результати ранжування альтернатив. Arman H., Hadi-Vencheh A., Kiani Mavi R., Khodadadipour M., Jamshidi A. акцентують увагу на обмеженнях евклідової метрики для нечітких чисел і підкреслюють її концептуальну невідповідність при роботі з такими даними.

Отже, методи багатокритеріального аналізу дозволяють не лише формалізувати процес вибору альтернатив, але й забезпечують обґрунтованість рішень, підвищуючи їхню ефективність і об'єктивність. Застосування сучасних методів та інформаційних технологій у багатокритеріальному прийнятті рішень сприяє автоматизації процесу ухвалення рішень, що є ключовим чинником у складних і динамічних системах в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконана у відповідності до тематики наукових планів кафедри комп'ютерних наук та системного аналізу Черкаського державного технологічного університету в рамках науково-дослідної роботи «Веб-орієнтовані інформаційні технології підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності, ризику та нечіткої інформації для підприємств малого і середнього бізнесу та закладів вищої освіти» (№ державної реєстрації: 0124U000900, 2024 – 2027 р.р.), де автор був виконавцем окремих розділів.

Мета і завдання дослідження.

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності прийняття рішень за рахунок розробки веб-орієнтованої інформаційної технології для розв'язання задач багатокритеріального прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації як відомими, так і вдосконаленими та комбінованими методами.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі *завдання* дисертаційного дослідження:

1. Проаналізувати предметну область наукового дослідження, сучасний стан розвитку інформаційних технологій підтримки прийняття рішень, існуючі моделі та методи багатокритеріального прийняття рішень, їх переваги та обмеження, систематизувати інформаційні ситуації прийняття рішень у складних умовах, зокрема в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації;
2. Розробити концептуальну модель, яка відображає взаємозв'язок між основними типами складних інформаційних ситуацій, що виникають при

багатокритеріальному прийнятті рішень, і на її основі розробити модель процесу прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації;

3. Розробити комбіновані та модифіковані методи для розв'язання задач багатокритеріального прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації, які є розвитком відомих методів багатокритеріального аналізу альтернатив;
4. Розробити веб-орієнтовану інформаційну технологію для розв'язання задач багатокритеріального прийняття рішень, що реалізує як відомі, так і розроблені моделі та методи прийняття рішень, а також забезпечує інтерактивну роботу користувача і дозволяє ефективно застосовувати розроблену інформаційну технологію на практиці;
5. Здійснити апробацію та впровадження результатів наукового дослідження, перевірити працездатність розробленої інформаційної технології на реальних і демонстраційних задачах прийняття рішень, переважно зі сфери управління ІТ-проектами, проаналізувати отримані результати застосування запропонованих моделей, методів та інформаційних засобів прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації.

Об'єктом дослідження є процес багатокритеріального прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації.

Предметом дослідження є моделі, методи та інформаційні засоби для розв'язання задач багатокритеріального прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації.

Методи дослідження. Методологічна основа дослідження представлена наступними методами: методи системного аналізу для формалізації предметної області та постановки задач; методи ризик-менеджменту для врахування умов ризику при прийнятті рішень; методи тайм-менеджменту у контексті ефективного планування та реалізації етапів розробки програмного забезпечення; методи математичного моделювання для побудови концептуальної моделі прийняття

рішень; методи експертного оцінювання для врахування оцінок фахівців у процесі прийняття рішень; методи розробки програмного забезпечення для реалізації інформаційної технології прийняття рішень.

Наукова новизна одержаних результатів.

Вперше:

- розроблено концептуальну модель R-U-F можливих інформаційних ситуацій прийняття рішень, яка відображає взаємозв'язок між основними типами складних інформаційних ситуацій, що виникають під час багатокритеріального прийняття рішень, зокрема: інформаційною ситуацією прийняття рішень в умовах ризику (Risk, R), інформаційною ситуацією прийняття рішень в умовах повної невизначеності (Uncertainty, U) та інформаційною ситуацією прийняття рішень в умовах нечіткої інформації (Fuzzy, F);
- розроблено модель процесу прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації, що відповідає запропонованій концептуальній R-U-F-моделі можливих інформаційних ситуацій прийняття рішень і передбачає вибір кількох методів прийняття рішень як традиційних, так і модифікованих, комбінованих та гібридних методів для розв'язання поставленої задачі з подальшим агрегуванням одержаних результатів.

Одержали подальший розвиток:

- метод матриці ризиків для визначення рівнів ризиків та їх пріоритетів, що дозволяє точніше оцінювати ризики за більшою кількістю критеріїв за рахунок відповідної модифікації, поєднуючи суб'єктивні експертні оцінки з об'єктивними математичними розрахунками за методом аналізу ієрархій;
- метод матриці Ейзенхауера для класифікації задач тайм-менеджменту, що використовує для визначення пріоритетів задач метод аналізу ієрархії, в результаті чого надаються рекомендації щодо послідовності виконання задач у відповідності до їх важливості та пріоритету;
- метод Fuzzy TOPSIS для вибору ефективної альтернативи в задачі багатокритеріального прийняття рішень за рахунок модифікації процедури обчислення коефіцієнту близькості до нечіткого позитивного ідеального

розв'язку (FPIS) та нечіткого негативного ідеального розв'язку (FNIS) шляхом застосування різних метрик, зокрема евклідової метрики, мангеттенської метрики, метрик Чебишова, Мінковського і Геммінга, а також використання результатів групової експертизи.

Удосконалено:

- модель управління ризиками в проєктах (Project Risk Management Model, PRMM) за рахунок введення додаткових компонент, серед яких: вхідна інформація, що містить відомості про наявні ризики проєкту, рівні ризиків, критерії оцінювання ризиків, експертні оцінки для кожного ризику за заданими критеріями; вихідна інформація, що містить відомості про відповідні рівні ризиків проєкту, вектор пріоритетів ризиків проєкту і вектор їх рангів, реєстр ризиків з переліком заходів щодо запобігання та усунення ризиків проєкту.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблено методику застосування декількох методів прийняття рішень в межах однієї задачі з агрегуванням результатів за різними підходами до визначення вагових коефіцієнтів методів, зокрема: за допомогою експертного оцінювання; з використанням процедури парних порівняння методу аналізу ієрархій; з використанням середнього геометричного для випадку рівної важливості методів.

2. Розроблено методику для порівняння результатів застосування методів прийняття рішень TOPSIS, FTOPSIS та їх модифікацій, одержаних за допомогою різних метрик для оцінювання коефіцієнту близькості до нечіткого позитивного ідеального розв'язку (FPIS) та нечіткого негативного ідеального розв'язку (FNIS);

3. Створено модулі веб-орієнтованої СППР, що реалізують розроблені моделі та методи багатокритеріального прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації, а також забезпечують інтерактивну роботу користувача і дозволяють ефективно застосовувати розроблену інформаційну технологію на практиці.

Практичне значення результатів роботи підтверджується впровадженням їх в практику управління інформаційними ризиками в ТОВ «Тріумф ІТ», м. Черкаси (акт використання результатів від 17.03.2025); ТОВ «РВК"ФЛАМІ», м. Черкаси

(акт використання результатів від 07.05.2025), а також в освітньому процесі ЧДТУ при підготовці навчальних матеріалів з дисциплін «Системи і методи прийняття рішень в управлінні стартапами та проєктами в галузі інформаційних технологій» для здобувачів освітнього ступеня магістр за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки, освітня програма «Управління стартапами і проєктами в галузі інформаційних технологій», з дисципліни вільного вибору «Нечіткі моделі і методи прийняття рішень» для здобувачів освітнього ступеня магістр всіх спеціальностей і всіх освітніх програм галузі знань 12 Інформаційні технології на кафедрі комп'ютерних наук та системного аналізу (акт використання результатів від 08.05.2025) (Додаток А).

Результати роботи можуть бути використані в діяльності організацій будь-якої форми власності та будь-якого напрямку бізнесу в процесах прийняття рішень.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати, що виносяться на захист, одержані здобувачем самостійно. У публікаціях, виконаних у співавторстві, особисто здобувачу належать: [1] – розробленні нового комбінованого методу розв'язання задачі тайм-менеджменту, що поєднує в собі метод аналізу ієрархії та метод матриці Ейзенхауера, а також створенні відповідного модуля веб-орієнтованої системи підтримки прийняття рішень; [2] – розроблення моделі управління ризиками проєкту (Project Risk Management Model), нового методу визначення рівнів ризиків та їх пріоритетів, який є комбінацією модифікованого методу матриці ризиків і методу аналізу ієрархій, а також створенні відповідного модуля веб-орієнтованої системи підтримки прийняття рішень; [4] – розроблення модифікованого методу Fuzzy TOPSIS для вибору ефективної альтернативи в задачі багатокритеріального прийняття рішень на основі різних метрик і використання результатів групової експертизи; розробленні методики для порівняння результатів застосування різних методів, одержаними за різними метриками для обчислення коефіцієнту близькості; [6] – проведення огляду і аналізу деяких існуючих систем для експертного оцінювання; [7] – проведення аналізу веб-ресурсів, що надають можливість розв'язувати задачі прийняття рішень в онлайн-режимі; [10] – побудова моделі управління ризиками проєкту (Project Risk

Management Model) та розробці методу для аналізу ризиків проєкту, який є комбінацією модифікованого методу матриці ризиків та методу аналізу ієрархій; розробленні веб-орієнтованого модуля системи підтримки прийняття рішень, що забезпечує автоматизацію процесу розподілу ризиків за критеріями важливості, визначення пріоритетів ризиків і їх ранжування, візуалізацію результатів аналізу ризиків, а також генерацію реєстру ризиків з рекомендаціями щодо їх запобігання та усунення.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на таких національних та міжнародних конференціях: VI Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології в освіті, науці і техніці» (ІТОНТ-2022), (Черкаси, 23-25 червня 2022 р.), VII Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології в освіті, науці і техніці» (ІТОНТ-2024), (Черкаси, 23-24 травня 2024 р.), II Міжнародна науково-практична конференція «Інновації та перспективні шляхи розвитку інформаційних технологій» (06 груд. 2023 р., м. Черкаси), IX Міжнародна науково-практична конференція з проблем вищої освіти і науки «Інформаційні технології в освіті, науці і виробництві (ІТОНВ-2023) (25-26 травня 2023 року, м. Луцьк), Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Актуальні задачі медичної, біологічної фізики та інформатики» (27 квітня 2022 року, Вінниця).

Публікації.

За результатами дослідження опубліковано 10 наукових праць: 2 наукові статті у іноземних виданнях, що індексуються у Scopus; 2 наукові статті у фахових виданнях України; 6 тез доповідей на наукових конференціях (Додаток Б).

Структура дисертації.

Дисертація включає вступ, 5 розділів, висновки та 7 додатків. Обсяг дисертації – 254 сторінки, з них основного тексту – 144 сторінки. Дисертація містить 73 рисунки, 16 таблиць в основному тексті та посилання на 239 використаних джерел.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1 Задача та основні етапи прийняття рішень

Під *прийняттям рішення* розуміється особливий вид людської діяльності, спрямований на вибір найкращого варіанта дії серед багатьох інших варіантів. Варіанти дій називаються *альтернативами*. Вибір найкращої альтернативи здійснюється за певними критеріями [1].

У роботі [2] зазначено, що *задача прийняття рішень* (ЗПР) – це така задача, яка може бути сформульована в термінах «цілі», «засоби», «результати».

У роботі [3] зазначено, що *задачею прийняття рішень* називають пару $\langle A, C \rangle$, де A – множина допустимих альтернатив, C – множина критеріїв оцінювання. Розв'язком задачі $\langle A, C \rangle$ є підмножина $A_{OP} \in A$, яка формується на основі застосування обраних критеріїв. Якщо множина критеріїв включає різнопланові та/або суперечливі вимоги, таку задачу називають *задачею багатокритеріального прийняття рішень* (ЗБПР) [3].

У нашому дослідженні задачу багатокритеріального прийняття рішень будемо представляти як кортеж:

$$\langle G, A, C, R \rangle, \quad (1.1)$$

де $G = \{G_1, G_2, \dots, G_p\}$ – множина цілей прийняття рішень;

$A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ – множина допустимих альтернатив;

$C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ – множина критеріїв оцінювання альтернатив;

R – очікуваний розв'язок задачі прийняття рішень.

Важливим результатом досліджень, проведених у рамках нормативної теорії прийняття рішень, є розробка математичних моделей, які дозволяють знайти розв'язок задачі багатокритеріальної прийняття рішень.

Нормативна теорія прийняття рішень – це система методів, які забезпечують підтримку прийняття рішень [3].

Математична модель ЗПР являє собою формальний опис елементів, які її складають [3].

Оксфордський словник визначає *прийняття рішень* як «процес ухвалення рішення щодо чогось важливого, особливо в групі людей або в організації» [4, 5].

На рисунку 1.1 наведено загальну схему прийняття рішень, яка відображає послідовні етапи процесу прийняття рішень від виникнення ситуації до отримання результату [6].

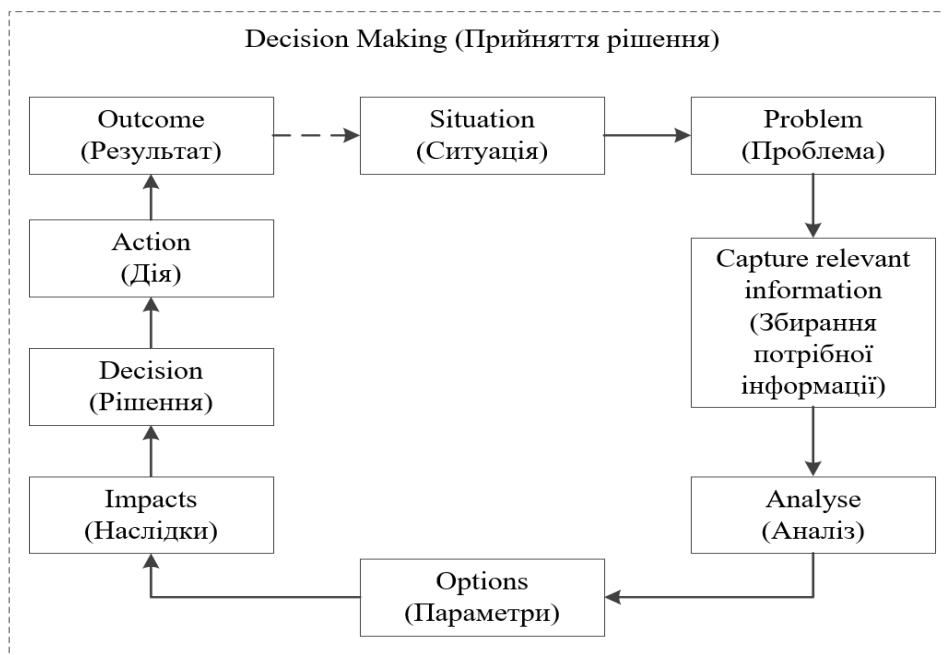


Рисунок 1.1 – Загальна схема прийняття рішень [розроблено на основі [4]]

На відміну від схеми прийняття рішень, представлені в роботі [4], на рисунку 1.1 зв'язок між етапом «Результат» та «Ситуація» не є обов'язковим (виділено пунктирною лінією), оскільки не всі задачі прийняття рішень мають циклічний характер. Циклічність, в даному випадку, є особливістю використання моделі на практиці, яка виходить за межі базової структури. Деякі рішення приймаються разово, наприклад, стратегічні або критичні рішення (будівництво об'єкта, запуск продукту), після яких процес не повторюється, а завершується. Але якщо є потреба в циклічності, тоді ставиться зв'язок між етапами «Результат» та «Ситуація». Загальна схеми прийняття рішень показує логічну послідовність кроків від ситуації до результату [4].

У роботі Волошина О.Ф., Машенка С.О. [7] представлено загальну схему прийняття рішень, яка складається з п'яти етапів: 1) визначення мети (цілі) та

засобів її досягнення; 2) побудова варіантів досягнення мети (множини альтернатив); 3) формування множини наслідків (оцінка альтернатив); 4) визначення принципу порівняння альтернатив (визначення принципу оптимальності) 5) Структурування множини альтернатив (розбиття на класи (кластеризація); упорядкування; вибір кращої (кращих)).

На відміну від цієї схеми, на рис. 1.2 наведено схему прийняття рішень, у якій змінено порядок етапів 3 і 4. Така модифікація зумовлена тим, що у багатьох ситуаціях прийняття рішень наслідки формуються після того, як визначено критерії оцінювання альтернатив, оскільки саме ці критерії впливають на їх оцінювання.

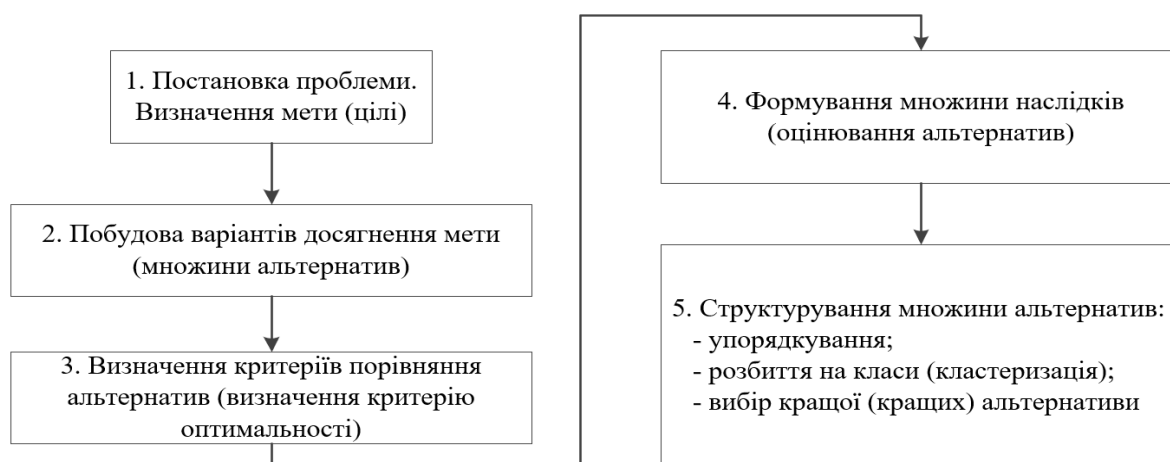


Рисунок 1.2 – Загальна схема прийняття рішень [розроблено на основі [7]]

Між 4 та 5 етапом відбувається вибір інформаційної технології, що включає в себе моделі, методи та засоби для розв’язання задачі прийняття рішень.

Отже, оскільки задача прийняття рішень поставлена та наведено основні етапи процесу прийняття рішень, виникає потреба у реалізації цих етапів за допомогою засобів підтримки прийняття рішень. Це, у свою чергу, передбачає залучення відповідних інформаційних технологій.

Формування понятійного апарату дослідження вимагає чіткого та структурованого підходу до визначення ключових понять: *інформаційна технологія підтримки прийняття рішень, система підтримки прийняття рішень*. У цьому контексті інформаційні технології підтримки прийняття рішень (ІТППР) доцільно розглядати як синтетичне поняття, що поєднує у собі ознаки загального поняття інформаційних технологій та специфічне призначення систем підтримки прийняття рішень (СППР).

Інформаційні технології (ІТ) – це ресурси, необхідні для отримання, обробки, зберігання та поширення інформації [8]. Інформаційна технологія стосується інструментів та засобів, які використовуються для обробки, зберігання, передачі та управління інформацією, що включає в себе: апаратне забезпечення; програмне забезпечення; мережеві технології; телекомунікації [9, 10].

Інформаційна система (ІС) – це більш широке поняття, яке охоплює не лише технології, а й людей, процеси та дані, які взаємодіють для збору, обробки, зберігання та розповсюдження інформації з метою підтримки бізнес-операцій та прийняття рішень. Іншими словами, ІС – це цілісна структура, яка дозволяє організації ефективно управляти інформацією [9, 10].

Таким чином, ІТ є частиною ІС. Без ІТ неможлива сучасна ІС, але ІС включає в себе набагато більше, ніж просто технології.

У літературі найчастіше зустрічається наступне визначення поняття СППР [11-18]:

– *Система підтримки прийняття рішень (СППР)* (англ. Decision Support System, DSS) – це інтерактивна комп'ютеризована система, призначена для допомоги керівникам та іншим користувачам у прийнятті рішень, особливо для неструктурованих або напівструктурованих проблем.

У межах даного дослідження ми дотримуємося такого визначення поняття СППР [14, 15]:

– *Системи підтримки прийняття рішень* (англ. Decision Support System, DSS) – інтерактивні комп'ютерні автоматизовані системи (програмні комплекси), що призначені для допомоги та підтримки різних видів діяльності людини при прийнятті рішень стосовно розв'язання слабоструктурованих або неструктурованих проблем.

Інформаційні технології підтримки прийняття рішень (ІТППР) – це сукупність технічних засобів, програмного забезпечення, моделей, методів та підходів, які забезпечують функціонування системи підтримки прийняття рішень [19, 20].

Отже, інформаційна технологія підтримки прийняття рішень є невід'ємною, але не єдиною частиною системи підтримки прийняття рішень. Оскільки СППР являє собою систему в цілому, яка використовує інформаційні технології як свій фундамент для досягнення цілей підтримки прийняття рішень.

Важливим аспектом є те, що ІТППР можуть реалізовуватися як у вигляді комплексних систем, так і у вигляді окремих програмних продуктів або модулів, що розв'язують одну конкретну задачу. Навіть якщо інформаційна технологія складається лише з одного модуля, вона все одно реалізує типові процеси: збирання, обробки, аналізу, представлення інформації, необхідних для прийняття рішення.

Це означає, що структурна цілісність та функціональна повнота ІТППР не залежать від масштабу реалізації, а визначаються саме наявністю ключових етапів інформаційного процесу та спрямованістю на підтримку прийняття рішень. Отже, будь-який програмний продукт, що забезпечує розв'язання окремої задачі прийняття рішень, можна розглядати як окремий випадок ІТППР, що реалізує обмежену, але повноцінну інформаційну технологію.

Поєднання загального поняття інформаційних технологій зі специфічним призначенням СППР у запропонованому визначенні ІТППР є обґрунтованим з таких причин:

- забезпечення цілісності розуміння ІТППР як технологічної платформи та функціональної системи;
- дозволяє відобразити структуру і призначення ІТППР через призму інформаційної діяльності, незалежно від рівня складності або масштабу реалізації;
- дає можливість адаптуватися до конкретних предметних областей та завдань, зберігаючи їх унікальність на концептуальному рівні.

Цей підхід узгоджується з існуючими науковими концепціями [1-3, 7] та сприяє формуванню комплексного бачення ІТППР як ключового інструменту прийняття рішень в умовах різних інформаційних ситуацій.

У процесі прийняття рішень користувачі СППР можуть виконувати різні ролі. Особою, що приймає рішення (ОПР), є людина, яка фактично здійснює вибір

найкращого варіанта дій на основі інформації, що надається інформаційною технологією. Окрім ОНР, у процесі прийняття рішень можуть брати участь інші учасники: власник проблеми, експерти, аналітики, активні групи, а також оточення ОНР – співробітники організації, від імені якої приймається рішення [1].

СППР є людино-машинною системою, що забезпечує особі, яка приймає рішення, можливість використовувати дані, знання, об'єктивні та суб'єктивні моделі для аналізу, оцінювання альтернатив і вибору рішень у слабкоструктурованих ситуаціях. Таким чином, СППР надають інформаційно-аналітичну підтримку всім учасникам процесу прийняття рішень, інтегруючи обробку даних, моделювання й візуалізацію результатів [1].

1.2 Класифікація систем підтримки прийняття рішень

Варто зазначити, що окрім СППР існують інші інформаційні системи, що допомагають ОНР приймати обґрунтовані та ефективні рішення [14, 15, 21-28]:

- *системи підтримки групового прийняття рішень* (англ. Group Decision Support System, GDSS) – це СППР орієнтовані на колективне прийняття рішень [24];
- *інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень* (англ. Intelligent Decision Support System, IDSS) – це системи, що поєднують СППР з методами штучного інтелекту (наприклад, рекомендаційні системи – програмно-алгоритмічні комплекси, що здійснюють підтримку процесу прийняття рішень шляхом автоматизованої генерації індивідуалізованих рекомендацій користувачеві на основі аналізу даних про попередню поведінку, вподобання, характеристики об'єкта або користувача, а також закономірностей у великих масивах інформації [26, 27]);
- *системи автоматизованого прийняття рішень* (Automated Decision-Making Systems, ADMS) – це системи, що повністю автоматизують процес прийняття рішень без участі людини [28];

- *інформаційні системи управління* (англ. Management Information Systems, MIS) – забезпечують збирання, обробку та представлення інформації для підтримки оперативного та тактичного управління [21, 23];
- *експертні системи* (англ. Expert System, ES) – це інформаційні системи, які моделюють експертизу в чітко визначеній галузі з метою імітації процесів прийняття рішень експертом [25].

У межах дисертаційної роботи розглянуто СППР, як один із найбільш поширених та ефективних інструментів, що застосовуються для підвищення обґрунтованості управлінських рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації. Розглянемо основні підходи до класифікації СППР за різними характеристиками.

За ступенем автоматизації розрізняють такі типи СППР [29, 30]:

- ручні системи – це системи, що надають користувачу інструменти, щоб він самостійно міг виконати більшість дій;
- напівавтоматизовані системи – це системи, що дають користувач можливість взаємодіяти із системою, яка пропонує варіанти рішень;
- автоматизовані системи – це системи, що самостійно приймають рішення або значно знижують участь людини.

За рівнем управління виділяють такі типи СППР [31]:

- операційного рівня – СППР призначені для підтримки рутинних, часто повторюваних рішень;
- тактичного рівня – СППР призначені для підтримки середньострокового планування та оптимізації ресурсів;
- стратегічного рівня – СППР призначені для аналізу довгострокових наслідків, прогнозування, сценарного планування.

За технологічною основою існує така класифікація СППР [27, 31, 32]:

- локальні СППР (local-based DSS), що встановлюються і працюють у межах локальної мережі організації;
- хмарні СППР (cloud-based DSS), які розміщені на хмарних ресурсах і доступні через інтернет;

- мобільні системи – це системи адаптовані до використання на мобільних пристроях;
- веб-орієнтовані СППР – це програмні системи, що використовують веб-інтерфейси для здійснення обробки даних і підтримки прийняття рішень через браузер, забезпечуючи доступність, гнучкість та інтеграцію з іншими онлайн-ресурсами.

За методами обробки інформації, виділяють такі типи СППР [32]:

- аналітичні СППР, що ґрунтуються на математичному моделюванні, методах оптимізації та методах прийняття рішень;
- СППР базовані на знаннях, що використовують логічні моделі представлення знань, правила логічного виведення;
- СППР, що використовують машинне навчання для формування моделей прийняття рішень на основі великих даних;
- СППР, що використовують мультиагентні системи на основі взаємодії методів та підходів розв’язування поставлених задач прийняття рішень як автономних агентів;

На рівні користувача виділяють такі види СППР [14, 24]:

- активна СППР, що пропонує користувачу, яке рішення краще обрати;
- пасивна СППР, що допомагає у процесі ухвалення рішення, але не пропонує користувачу, яке рішення прийняти;
- кооперативна СППР, що дозволяє ОПР змінювати, поповнювати або покращувати рішення, пропоновані системою в співпраці з іншими учасниками процесу прийняття рішень.

На технічному рівні розрізняють такі СППР [33, 34]: СППР рівня підприємства, що використовує великі сховища даних і обслуговує багатьох менеджерів підприємства; персональна настільна СППР: мала система, що обслуговує лише одного користувача.

На концептуальному рівні відрізняють такі типи СППР [24, 34]:

- СППР, керована повідомленнями (Communication-Driven DSS), що підтримує групу користувачів, які працюють над виконанням загальної задачі;
- СППР, керована даними (Data-Driven DSS, Data-oriented DSS), що в основному орієнтується на доступ і маніпуляції з даними для прийняття рішень;
- СППР, керована документами (Document-Driven DSS), яка здійснює пошук і маніпулювання неструктурованою інформацією, заданої в різних форматах, для прийняття рішень;
- СППР, керована знаннями (Knowledge-Driven DSS), що забезпечує розв'язання задач прийняття рішень у вигляді фактів, правил, процедур;
- СППР, керована моделями (Model-Driven DSS), що забезпечує доступ і маніпуляції з математичними моделями (статистичними, фінансовими, оптимізаційними, імітаційними) для прийняття рішень;
- інтер-організаційні СППР (Inter-Organizational DSS), що забезпечують підтримку прийняття рішень між кількома організаціями, сприяючи координації та взаємодії між ними;
- інтра-організаційні СППР (Intra-Organizational DSS), що функціонують у межах однієї організації, підтримуючи управлінські рішення всередині її структурних підрозділів;
- спеціалізовані СППР (Function-Specific DSS), що розроблені для підтримки рішень у конкретній галузі або для вирішення специфічних завдань;
- СППР загального призначення (General Purpose DSS) – СППР, що створені для широкого кола завдань і можуть адаптуватися до різних предметних галузей;
- СППР на базі веб-технологій (Web-Based DSS), доступ до яких здійснюється через Інтернет, що забезпечує обробку даних і прийняття рішень за допомогою веб-інтерфейсу.

За наявності інтелектуального компонента в СППР розрізняють [14]: системи, які не передбачають будь-яких способів накопичення і обробки погано формалізованих даних; системи, що мають бази знань, механізми виведення та пояснення отриманих рішень.

Розмаїття систем підтримки прийняття рішень відображає широкий діапазон різних форм, розмірів та типів СППР. В роботі [1] зазначено, що практично всі види цих комп'ютерних систем характеризуються чіткою структурою, яка містить три головні компоненти (рис. 1.3): підсистему інтерфейсу користувача; підсистему керування базою даних; підсистему керування базою моделей.

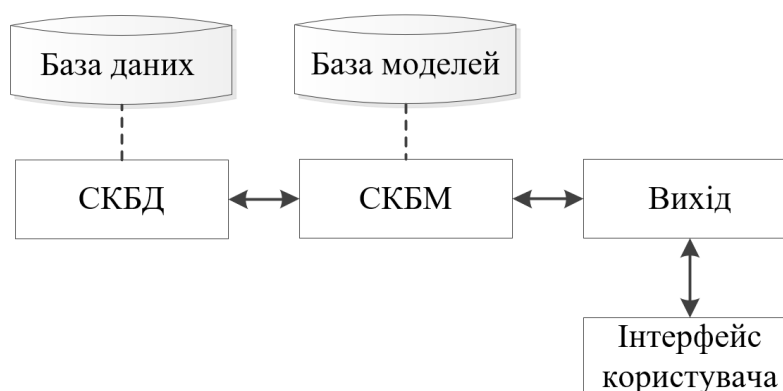


Рисунок 1.3 – Структура СППР на основі роботи [розроблено на основі [1]]

У структурі СППР (рис. 1.3), наведеній у роботі [1], представлено її основні компоненти, але у цій структурі відсутній спеціалізований модуль для розв'язання задачі прийняття рішень. Без цього модуля система обмежується лише наданими даними та базовими механізмами виведення, що може значно знизити ефективність прийняття рішень, особливо у складних або невизначених ситуаціях.

Тому, доцільно у структурі СППР, представлений на рис. 1.3, додати компонент «Модуль розв'язання задач прийняття рішень». Такий підхід узгоджується з концепцією СППР, у якій важливим є не лише представлення результатів обчислень, а й формування релевантних, математично обґрунтованих і практично орієнтованих рекомендацій щодо прийняття рішень. Також такий підхід відображає зростаючі вимоги до інтелектуалізації інформаційних систем та спрямований на підвищення ефективності процесу прийняття рішень. Модуль надання рекомендацій забезпечує інтерпретацію результатів моделювання з урахуванням контексту задачі, обмежень, наявних даних та встановлених

пріоритетів, а також може реалізовувати функціональність адаптивного аналізу на основі історичних даних та реалізованих методів в межах СППР. Отже, зазначена модифікація сприяє підвищенню прикладної цінності структури СППР та її здатності підтримувати складні управлінські рішення.

З розвитком мережі Інтернет СППР набувають веб-орієнтованого характеру. В роботі [1] представлена структура веб-орієнтованої СППР (рис. 1.4).

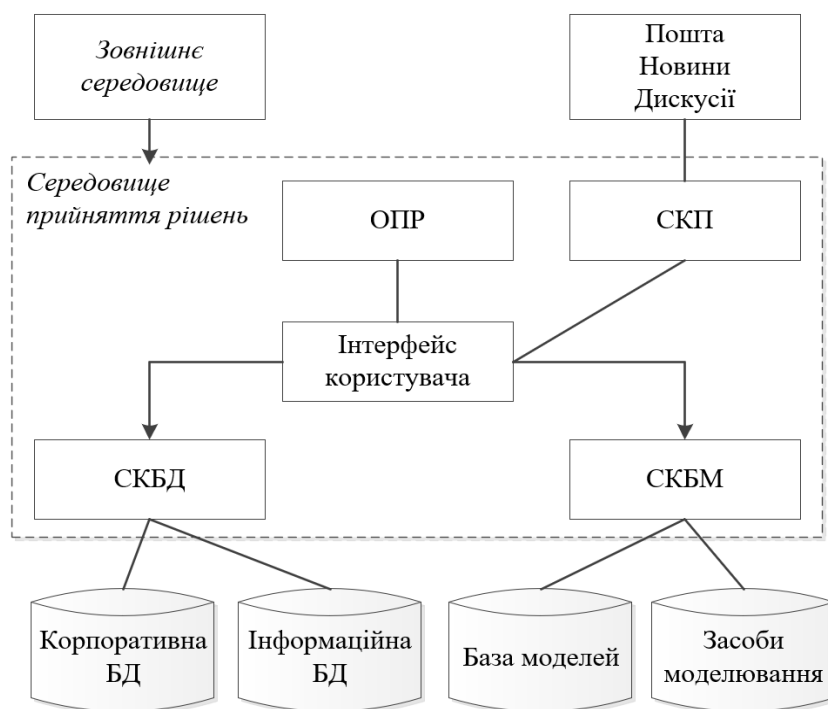


Рисунок 1.4 – Структура веб-орієнтованої СППР [розроблено на основі [1]]

При цьому блок для розв’язання задач прийняття рішень виділяється окремо в блок «Модельні компоненти», що наведено на рисунку 1.5.

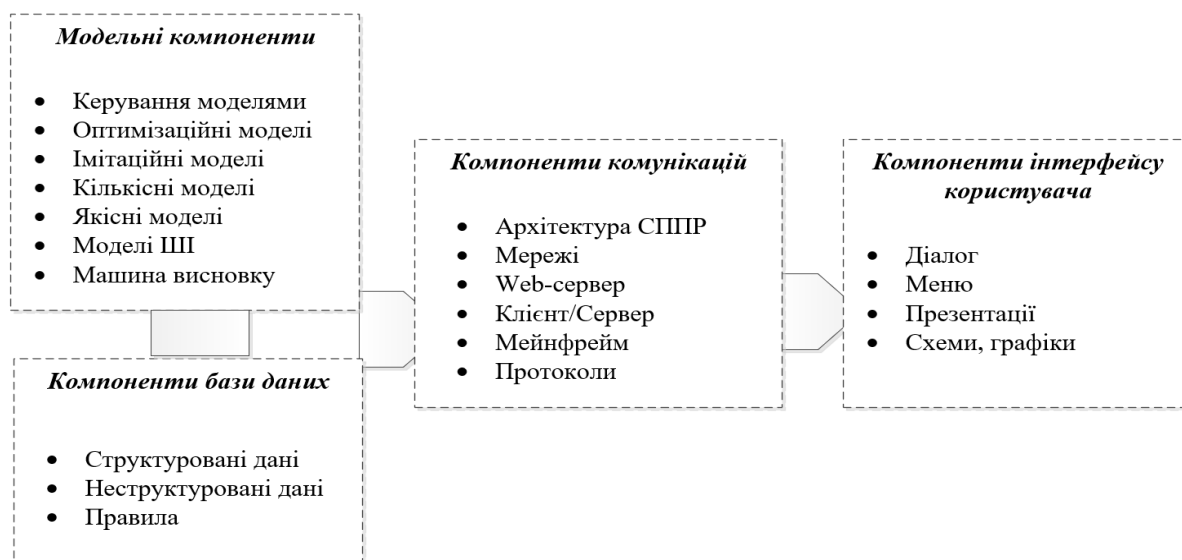


Рисунок 1.5 – Компоненти підсистеми СППР [розроблено на основі [1]]

Структури СППР, наведені на рисунках 1.3-1.5, є недостатньо гнучкими, не відповідають сучасним уявленням про структуру та архітектуру таких систем, тому постає задача оновлення цієї структури з урахуванням сучасних підходів до архітектури веб-орієнтованих СППР.

1.3 Веб-орієнтовані системи підтримки прийняття рішень

Сучасні СППР, що використовують веб-технології для забезпечення інтерактивної підтримки процесу прийняття рішень, мають багаторівневу архітектуру (англ. Multitier architecture) [35, 36] та містять такі рівні.

1. Рівень зовнішнього середовища (External Environment Tier) представляє собою джерела зовнішньої інформації, такі як новини, пошта, дискусії, які можуть впливати на процес прийняття рішень. Цей рівень підкреслює важливість врахування контексту та зовнішніх факторів.

2. Рівень середовища прийняття рішень (Decision-Making Environment Tier) – це центральний рівень, що об'єднує основні компоненти СППР. Він включає в себе наступні елементи: ОПР (особу, що приймає рішення); СКП (систему керування повідомленнями); інтерфейс користувача; СКБД (Система керування базами даних); СКБМ (Система керування базами моделей);

3. Рівень даних та моделей (Data and Model Tier), що містить сховища даних та інструменти для аналізу, і складається з наступних компонентів: корпоративна БД, яка містить структуровані дані, що відображають діяльність організації; інформаційна БД може містити менш структуровані дані, необхідні для прийняття рішень; база моделей зберігає різноманітні аналітичні та прогностичні моделі; засоби моделювання містять інструменти для побудови, модифікації та використання моделей.

Архітектура сучасних веб-орієнтованих інформаційних систем, зокрема систем підтримки прийняття рішень (СППР), зазвичай передбачає розподіл на дві ключові частини: фронтенд та бекенд. Такий поділ зумовлений функціональними, логічними та технологічними особливостями компонентів системи [37].

Фронтенд (англ. frontend, клієнтська частина) – це частина системи, що забезпечує взаємодію користувача з функціоналом через веб-інтерфейс [38].

Бекенд (англ. backend, серверна частина) – це програмно-апаратна частина системи, що відповідає за обробку запитів, виконання бізнес-логіки, управління даними та забезпечення зв'язку з базами даних та іншими сервісами [39].

Чітке розмежування фронтенду та бекенду дозволяє досягти модульності, масштабованості, незалежності в розробці та супроводі окремих компонентів, а також спрощує інтеграцію зовнішніх сервісів і реалізацію мікросервісної архітектури [37]. Відповідно, на рисунку 1.6 продемонстровано розроблену архітектуру сучасної веб-орієнтованої системи підтримки прийняття рішень, що втілює модульний, багаторівневий, масштабований та гнучкий підхід.

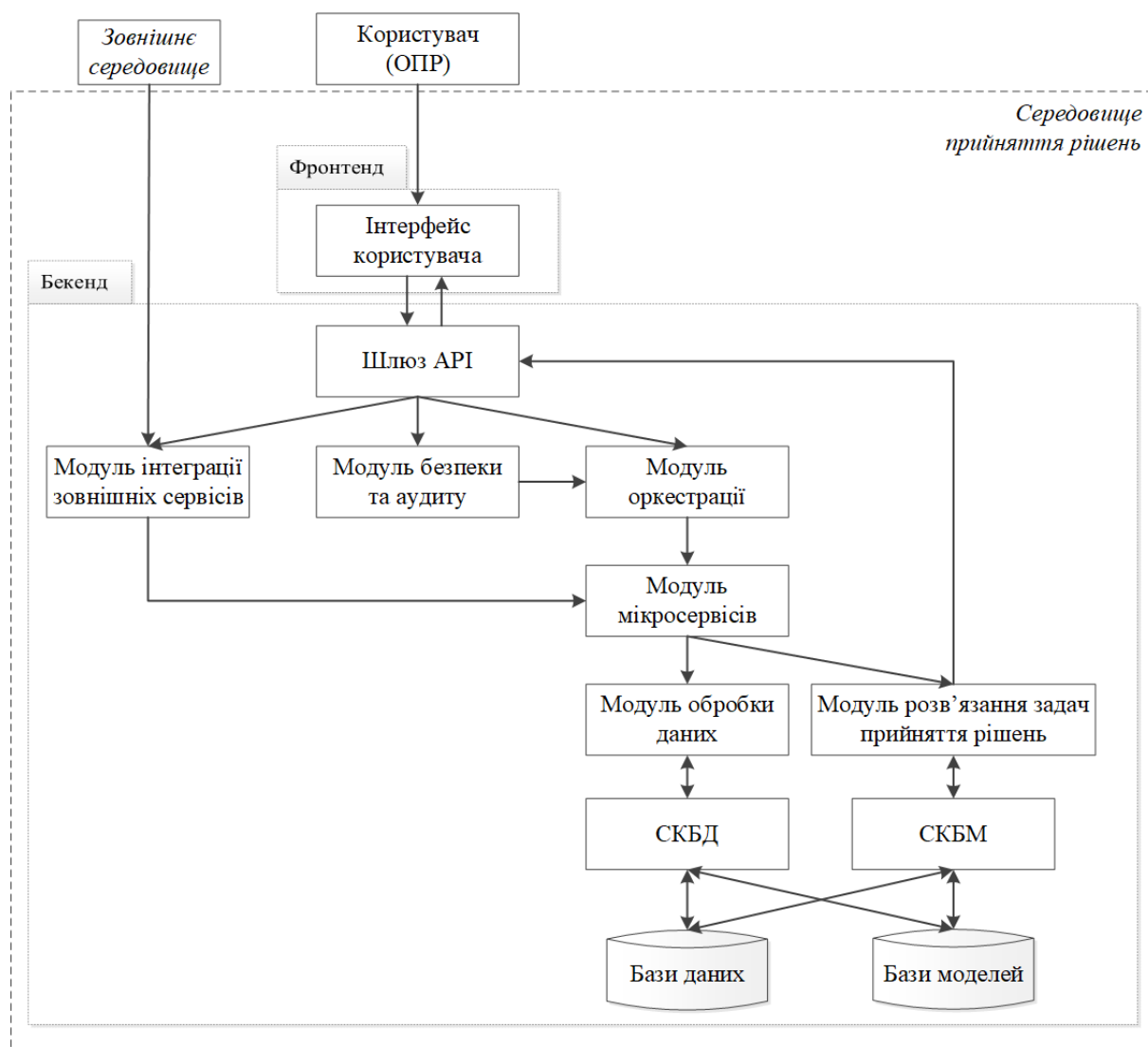


Рисунок 1.6 – Сучасна структура веб-орієнтованої системи підтримки прийняття рішень [розроблено автором]

Наведена структура (рис. 1.6) спроектована для обробки значних обсягів даних, інтеграції різнорідних інформаційних джерел та надання користувачам ефективних інструментів для аналізу й прийняття обґрунтованих рішень.

Користувач (ОПР) взаємодіє з системою через блок «Фронтенд», який включає «Інтерфейс користувача» (UI) для ініціювання запитів, введення інформації та перегляду результатів. «Інтерфейс користувача», як правило, реалізується на базі сучасних веб-технологій (HTML, CSS, JavaScript та frontend-фреймворків, наприклад, React, Angular або Vue.js), і відповідає за візуальне представлення даних у вигляді інтерактивних дашбордів, графіків та звітів, обробку команд користувача та передавання запитів до «Шлюзу API».

Центральною точкою входу для всіх запитів від «Інтерфейсу користувача» слугує «Шлюз API» (Application Programming Interface Gateway), що може використовувати протоколи REST або GraphQL. Цей компонент маршрутизує запити до відповідних внутрішніх сервісів, зокрема він взаємодіє з:

- «Модулем безпеки та аудиту» для застосування політик безпеки (наприклад, OAuth2, JWT, Audit Logs);
- «Модулем інтеграції зовнішніх сервісів» для обміну даними із «Зовнішнім середовищем»;
- «Модулем оркестрації» для управління мікросервісною архітектурою.

«Шлюз API» також може виконувати агрегування даних, балансування навантаження та кешування.

«Модуль оркестрації» відповідає за управління життєвим циклом, масштабування та розгортання «Модуля мікросервісів». «Модуль мікросервісів» містить ключову бізнес-логіку системи і включає:

- «Модуль обробки даних», який є ключовим для підготовки інформації до аналізу, й виконує процеси ETL (Extract, Transform, Load – вилучення, трансформація, завантаження), здійснює очищення, валідацію та структурування даних перед їх завантаженням у «СКБД» (систему керування базами даних), яка взаємодіє з «Базами даних»;

- «Модуль розв’язання задач прийняття рішень», інформація про який наведена нижче.

Дані, оброблені «Модулем обробки даних», завантажуються та зберігаються у «Базах даних» за допомогою «СКБД». «Бази даних» слугують центральним репозиторієм і можуть поєднувати різні технології зберігання даних – реляційні бази даних (SQL) для структурованої інформації, NoSQL бази даних для гнучких схем та платформи Big Data для обробки великих обсягів різномірних даних. Цей компонент забезпечує надійне зберігання оброблених та необроблених даних, надаючи до них доступ іншим компонентам.

У сучасних підходах до створення інформаційних систем доцільно використовувати декілька типів баз даних в залежності від особливостей інформації для збереження. Такий підхід відомий як поліглотна персистентність (polyglot persistence) – це концепція, що передбачає застосування різних технологій зберігання даних для використання інформації різного типу в межах однієї системи [40, 41]. Наприклад, реляційні СКБД (такі як PostgreSQL, MySQL) ефективні для структурованих табличних даних з чіткою схемою, у той час як документоорієнтовані БД (наприклад, MongoDB) або графові БД (наприклад, Neo4j) краще підходять для зберігання слабоструктурованих даних, які важко відобразити у традиційній табличній формі. Використання різних типів баз даних дозволяє підвищити продуктивність, масштабованість та адаптивність системи до змін у структурі та типі даних.

Компонент системи «Бази моделей» використовується для зберігання моделей прийняття рішень, наприклад, навчених моделей шляхом застосування алгоритмів машинного навчання. Доступ до «Бази моделей» та управління ними здійснюється за допомогою «СКБМ» (системи керування базами моделей). Цей підхід важливий для управління життєвим циклом моделей та їх відтворюваності.

Ядром СППР є компонент «Модуль розв’язання задач прийняття рішень», що є частиною «Модуля мікросервісів». Він перетворює підготовлені дані на знання шляхом застосування розроблених методів прийняття рішень. Цей модуль використовує дані, оброблені «Модулем обробки даних» (які зберігаються в «Базах

даних)), та моделі з «Бази моделей» для виконання аналітичних завдань. Результати аналізу передаються користувачеві через «Шлюз API» та «Інтерфейс користувача».

Для взаємодії із «Зовнішнім середовищем» система використовує «Модуль інтеграції зовнішніх сервісів». Цей компонент, підключений до «Шлюзу API», дозволяє отримувати дані з зовнішніх API, реагувати на події через Webhooks, а також може надсилати сповіщення (наприклад, електронною поштою).

Як зазначалося, «Модуль оркестрації» керує «Модулем мікросервісів», використовуючи такі технології, як Kubernetes та Docker. Це забезпечує розгортання, масштабування, відмовостійкість, ефективне використання ресурсів та гнучкість системи. Для простіших варіантів контроль працездатності може здійснюватися налаштуваннями веб-сервера (Apache, Nginx).

Важливим компонентом архітектури веб-орієнтованої СППР є «Модуль безпеки та аудиту», який підключений до «Шлюзу API». Цей компонент відповідає за автентифікацію користувачів (наприклад, через OAuth2), авторизацію доступу до даних та функцій на основі ролей чи атрибутів (з використанням JWT), шифрування даних під час передачі та зберігання, а також ведення детальних журналів аудиту всіх значущих подій у системі. «Модуль безпеки та аудиту» забезпечує контроль доступу для запитів, що проходять через «Шлюз API», та взаємодіє з іншими сервісами для запису їхніх дій, забезпечуючи цілісність, конфіденційність та підзвітність системи.

Така комплексна структура дозволяє створити потужну, гнучку та безпечну СППР, готову до сучасних викликів обробки даних та підтримки прийняття рішень.

Використання веб-технологій як основної платформи для доступу та взаємодії з СППР забезпечує [15-18]:

- універсальний доступ: користувачі можуть отримувати доступ до системи з будь-якого пристрою, що має веб-браузер та підключення до мережі;
- зручний інтерфейс: веб-інтерфейси є інтуїтивно зрозумілими та забезпечують візуалізацію даних та результатів;

- легкість розгортання та оновлення: централізоване розгортання та оновлення веб-додатків спрощує адміністрування системи;
- можливість інтеграції: веб-сервіси та API дозволяють інтегрувати СППР з іншими корпоративними системами та зовнішніми джерелами даних.

Веб-орієнтовані системи підтримки прийняття рішень можуть бути заснованими на знаннях, комунікаціях, моделях, документах, або бути гібридними. [42-44]. Інтерактивний підхід до підтримки прийняття рішень є визначальним і ґрунтується на положенні, згідно з яким на кожному етапі цього процесу СППР повинна надавати ОПР релевантну, достатню та належно структуровану інформацію [3].

У дослідженні проаналізовано приклади деяких веб-ресурсів, які забезпечують підтримку процесів прийняття рішень, зокрема: Decision Lens [45], Business Performance Management [46], Online Output [47], 123ahp [48], Expert Choice [49], Super Decisions [50], SpiceLogic [51]. Результати проведеного аналізу наведено в додатку В «Огляд веб-ресурсів для прийняття рішень».

На основі проведеного аналізу зазначених веб-ресурсів підтримки прийняття рішень було виділено їх найбільш поширені недоліки:

1. Обмежений безкоштовний функціонал – більшість систем у безкоштовних версіях мають значні обмеження, зокрема щодо кількості учасників групової експертизи, обсягу даних чи доступу до деяких інструментів;
2. Інтуїтивно незрозумілий або застарілий інтерфейс – деякі платформи потребують від користувачів спеціальних знань для введення даних (наприклад, введення чисел вручну замість вибору зі шкали Сааті), що ускладнює їх використання недосвідченими користувачами;
3. Відсутність або обмежені можливості візуалізації результатів – не всі системи забезпечують наочне подання даних та результатів розв’язку задачі, що ускладнює їх інтерпретацію та представлення зацікавленим сторонам;
4. Недостатня гнучкість у налаштуваннях моделей – окремі рішення не дозволяють будувати складні багаторівневі ієрархії або мережі, що обмежує їх застосування при розв’язанні комплексних завдань прийняття рішень.

5. Відсутність або слабкий захист даних – іноді використовуються незахищені протоколи передавання даних або не передбачена приватність групових експертиз.

6. Висока вартість розширених функцій – у платних версіях ціна може бути значною, що робить такі системи недоступними для невеликих організацій чи індивідуальних користувачів.

7. Більшість систем підтримують лише один метод прийняття рішень, зокрема метод аналізу ієрархій (MAI). Окрім того, вони не підтримують режим розв’язання задачі прийняття рішень кількома методами одночасно з агрегуванням одержаних результатів.

Загалом, вибір СППР залежить від цілей її використання, розміру компанії, бюджету та потреб у функціональності. Для освітніх цілей і невеликих завдань доцільно використовувати безкоштовні платформи, тоді як для корпоративних рішень або складних багаторівневих завдань варто обирати комерційні рішення з розширеним функціоналом.

Загальна схема створення СППР може залежати від: окремої ОПР і/або групи призначених ОПР; індивідуальних рис особистості користувача; стилю його керівництва; задач прийняття рішень; специфіки конкретної проблеми.

При створенні СППР необхідним етапом є ініціація цієї розробки, що передбачає апріорне визначення детальних технічних специфікацій, що ускладнюється високим рівнем невизначеності щодо кінцевих потреб користувача. Як наслідок, процес розробки набуває ітеративного характеру, що передбачає безперервну адаптацію функціональних можливостей системи до еволюціонуючих вимог користувача. Ключовою особливістю даного підходу є активне залучення ОПР у процес проектування та тестування СППР. Така інтерактивна співпраця забезпечує емпіричне виявлення прихованих потреб та специфічних когнітивних особливостей ОПР, сприяючи поступовому уточненню технічного завдання. Ітерації розробки тривають до досягнення консенсусу між розробником та ОПР щодо повної відповідності розробленої СППР заявленим функціональним критеріям.

Для створення СППР можуть бути використані різні моделі життєвого циклу програмного забезпечення (ПЗ), в залежності від потреб проєкту, вимог до гнучкості, масштабованості та термінів реалізації [52]. Наприклад, *каскадна модель* (англ. Waterfall) [53]; *ітераційна модель* (англ. Iterative and incremental development) [54]; *спіральна модель* (англ. Spiral model) [55]; *гнучка методологія* (англ. Agile) [56, 57]; *модель V-образного циклу* (англ. V-model) [58]; *методологія RAD* (англ. Rapid Application Development) [59].

Усі вищезазначені моделі можуть бути адаптовані в залежності від конкретних потреб проєкту. Якщо важливий строгий контроль над процесом і чітке планування, можна вибрати каскадну модель або V-образний цикл. Якщо ж потрібно швидко впроваджувати зміни, то більш підходящими будуть Agile або ітераційна модель. Схему створення СППР представлено у відповідності до каскадної моделі життєвого циклу програмного забезпечення (рис. 1.7).

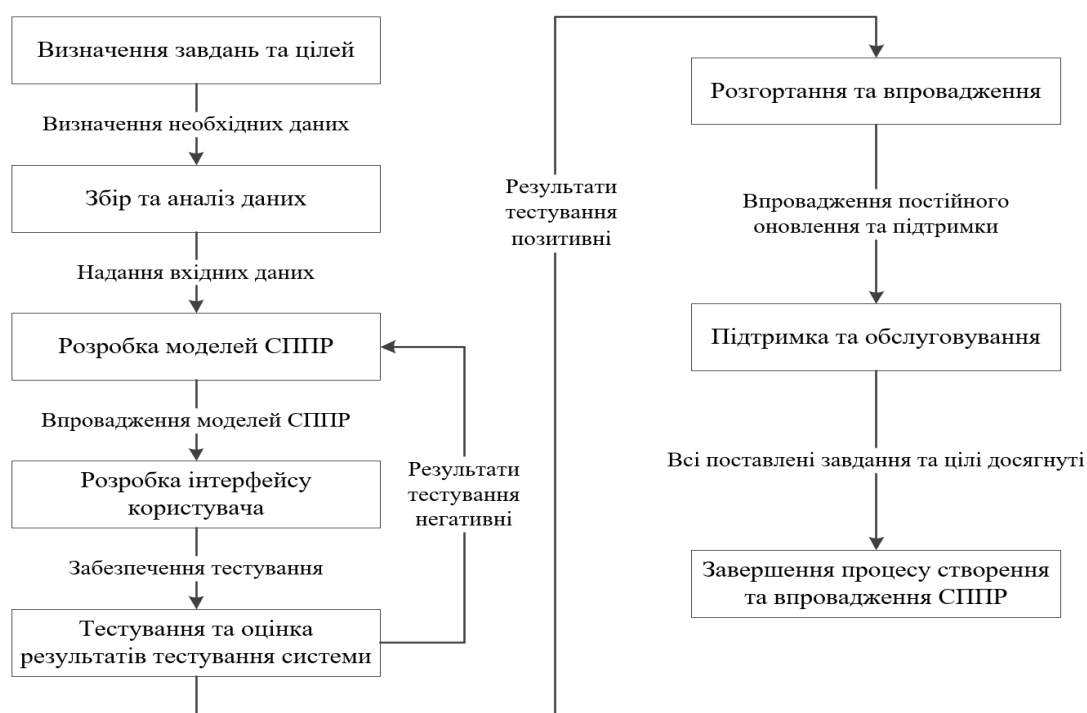


Рисунок 1.7 – Загальна схема створення СППР [на основі робіт [22, 53]]

Крім того, каскадна модель дозволяє детально документувати кожен етап, забезпечуючи належну перевірку та тестування системи, що є критичним для високої точності і надійності технології прийняття рішень.

Вибір цієї моделі також сприяє чіткому прогнозуванню термінів виконання, що важливо для досягнення бажаних результатів в умовах обмеженого часу.

1.4 Постановка задачі дослідження

За результатами проведеного огляду та аналізу існуючих систем та інформаційних технологій прийняття рішень, а також з урахуванням актуальних викликів, пов'язаних із складністю, динамічністю та високими вимогами до ефективності прийняття рішень в умовах багатокритеріальності, ризику, невизначеності та нечіткої інформації, була сформульована задача дисертаційного дослідження.

При прийнятті рішень часто вибір ефективних альтернатив здійснюється за наявності багатьох критеріїв, яким вони мають задовольняти, при цьому ці критерії часто суперечать одне одному, окрім того умови зовнішнього середовища відносяться до ситуацій коли є ризику, невизначеність та нечіткість вхідних даних. У таких умовах традиційні підходи до аналізу та вибору альтернатив не завжди забезпечують належну точність, гнучкість і адаптивність у складних ситуаціях, що потребує удосконалення існуючих і створення нових моделей, методів та інформаційних технологій прийняття рішень.

Це обумовлює вирішення важливої та актуальної *науково-прикладної задачі*, що полягає в удосконаленні існуючих та розробці нових моделей, методів та інформаційних засобів, які дозволять підвищити ефективність прийняття рішень в умовах багатокритеріальності, ризику, невизначеності та нечіткої інформації.

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності прийняття рішень за рахунок розробки веб-орієнтованої інформаційної технології для розв'язання задач багатокритеріального прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації як відомими, так і вдосконаленими та комбінованими методами.

Об'єктом дослідження є процес багатокритеріального прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації.

Предметом дослідження є моделі, методи та інформаційні засоби для розв'язання задач багатокритеріального прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання дисертаційного дослідження:

1. Проаналізувати предметну область наукового дослідження, сучасний стан розвитку інформаційних технологій підтримки прийняття рішень, існуючі моделі та методи багатокритеріального прийняття рішень, їх переваги та обмеження, систематизувати інформаційні ситуації прийняття рішень у складних умовах, зокрема в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації;

2. Розробити концептуальну модель, яка відображає взаємозв'язок між основними типами складних інформаційних ситуацій, що виникають при багатокритеріальному прийнятті рішень, і на її основі розробити модель процесу прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації;

3. Розробити комбіновані та модифіковані методи для розв'язання задач багатокритеріального прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації, які є розвитком відомих методів багатокритеріального аналізу альтернатив;

4. Розробити веб-орієнтовану інформаційну технологію для розв'язання задач багатокритеріального прийняття рішень, що реалізує як відомі, так і розроблені моделі та методи прийняття рішень, а також забезпечує інтерактивну роботу користувача і дозволяє ефективно застосовувати розроблену інформаційну технологію на практиці;

5. Здійснити апробацію та впровадження результатів наукового дослідження, перевірити працездатність розробленої інформаційної технології на реальних і демонстраційних задачах прийняття рішень, переважно зі сфери управління ІТ-проектами, проаналізувати отримані результати застосування запропонованих моделей, методів та інформаційних засобів прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації.

З урахуванням мети і завдань структура дослідження базується на використанні методів багатокритеріального аналізу, математичної статистики, теорії ймовірностей і теорії нечітких множин, інтегрованих у систему підтримки прийняття рішень на основі веб-орієнтованих інформаційних технологій.

Структура наукового дослідження представлена на рисунку 1.8.



Рисунок 1.8 – Структура наукового дослідження [розроблено автором]

Реалізація поставлених задач передбачає застосування комплексу *методів дослідження*, а саме:

1. Методи системного аналізу для формалізації предметної області та постановки задач;
2. Методи ризик-менеджменту для врахування умов ризику при прийнятті рішень;
3. Методи тайм-менеджменту у контексті ефективного планування та реалізації етапів розробки програмного забезпечення;
4. Методи математичного моделювання для побудови концептуальної моделі прийняття рішень;
5. Методи експертного оцінювання для врахування оцінок фахівців у процесі прийняття рішень;
6. Методи розробки програмного забезпечення для реалізації інформаційної технології прийняття рішень.

Виконання зазначених завдань дозволить досягти мети дослідження шляхом створення моделей, методів та веб-орієнтованої інформаційної технології для розв'язання задач багатокритеріального прийняття рішень, що забезпечують комплексну оцінку альтернатив і підвищують ефективність процесу прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації.

1.5 Висновки до розділу 1

У межах першого розділу розглянуто теоретичні відомості щодо систем підтримки прийняття рішень, інформаційних технологій підтримки прийняття рішень та їх призначення. Наведено постановку задачі прийняття рішень та задачі багатокритеріального прийняття рішень. Розглянуто основні етапи прийняття рішень, надано загальну схему прийняття рішень.

Розглянуто різні види інформаційних систем, що допомагають ОПР приймати обґрунтовані та ефективні рішення, зокрема: системи підтримки прийняття рішень (DSS); системи підтримки групового прийняття рішень (GDSS); інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень (IDSS); системи

автоматизованого прийняття рішень (ADMS); інформаційні системи управління (MIS); експертні системи (ES).

Надано класифікацію систем підтримки прийняття рішень за різними ознаками, зокрема: за ступенем автоматизації; за рівнем управління; за технологічною основою; за методами обробки інформації; на рівні користувача; на технічному рівні; на концептуальному рівні; за наявністю інтелектуального компонента.

Також у межах розділу наведено класичну структуру СППР та структуру веб-орієнтованої СППР з її можливими компонентами, виділено недоліки цих структур. Запропоновано сучасну структуру веб-орієнтованої системи підтримки прийняття рішень, наведено опис її компонентів та особливості їх взаємодії для забезпечення інтерактивної підтримки процесу прийняття рішень. Сучасна структура веб-орієнтованої системи підтримки прийняття рішень забезпечує масштабування, відмовостійкість, ефективне використання ресурсів та гнучкість системи.

Розглянуто загальну схему та моделі створення веб-орієнтованих інформаційних технологій підтримки прийняття рішень. Визначено етапи створення та впровадження СППР. Проведено огляд деяких існуючих веб-орієнтованих ресурсів підтримки прийняття рішень, здійснено аналіз їх переваг та недоліків.

Виконано постановку задачі дослідження та розроблено структуру наукового дослідження, що включає в себе мету дослідження, об'єкт дослідження, предмет дослідження, наукову задачу, завдання дослідження, комплекс методів дослідження, очікуваний результат дослідження.

Результати досліджень першого розділу опубліковані в роботах [60, 61].

Список використаних джерел до розділу 1

1. Ситник В. Ф. Системи підтримки прийняття рішень: Навч. посіб. К.: КНЕУ, 2009. 614 с.
2. Кігель В. Р. Методи і моделі підтримки прийняття рішень у ринковій економіці [Текст] : монографія / В. Р. Кігель. К. : ЦНЛ, 2003. 202 с.

3. Братушка С. М., Новак С. М., Хайлук С. О. Системи підтримки прийняття рішень : навчальний посібник для самостійного вивчення дисципліни. Державний вищий навчальний заклад «Українська академія банківської справи Національного банку України». Суми : ДВНЗ «УАБС НБУ», 2010. 265 с.
4. Decision-making noun - Definition, pictures, pronunciation and usage notes | Oxford Advanced Learner's Dictionary at OxfordLearnersDictionaries.com. URL: <https://www.oxfordlearnersdictionaries.com/definition/english/decision-making> (дата звернення: 25.05.2025).
5. Tzeng, G.H. and Huang, J.J. (2011). Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. Boca Raton, FL: CRC Press. 350 p.
6. Tools and techniques for decision making. URL: <https://expertassignmenthelp.org/tools-and-techniques-for-decision-making> (дата звернення: 25.05.2025).
7. Волошин О.Ф., Мащенко С.О. Моделі та методи прийняття рішень: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / О.Ф. Волошин, С.О. Мащенко. 3-є вид., перероб. К.: «Видавництво Людмила», 2018. 292 с.
8. ISO/IEC/IEEE 24765:2017. Systems and software engineering – Vocabulary. 2nd ed. Geneva: International Organization for Standardization, 2017. 522 p.
9. Laudon, K. C., & Laudon, J. P. (2020). Management Information Systems: Managing the Digital Firm. Pearson. 645 p.
10. Rainer, R. K., & Cegielski, C. G. (2020). Introduction to Information Systems. Wiley.
11. Keen, Peter (1980). Decision support systems: a research perspective. Cambridge, Massachusetts : Center for Information Systems Research, Alfred P. Sloan School of Management. 50 p.
12. Decision Support Systems | Oxford Research Encyclopedia of Politics. URL: <https://oxfordre.com/politics/display/10.1093/acrefore/9780190228637.001.0001/acrefore-9780190228637-e-1008> (дата звернення: 25.05.2025).
13. Decision Support System (DSS): What It Is and How Businesses Use Them. URL: <https://www.investopedia.com/terms/d/decision-support-system.asp> (дата звернення: 25.05.2025).

14. Бідюк П. І., Коршевніук Л. О. Проектування комп'ютерних інформаційних систем підтримки прийняття рішень : навчальний посібник. Київ : ННК «ІПСА» НТУУ «КПІ», 2010. 340 с.
15. Gaur, L., Chatterjee, P., & Agarwal, V. (2023). *Intelligent Decision Support Systems for Smart City Applications*. Chichester, UK: Wiley. 272 p.
16. Decision Support System (DSS) - Overview, Components, Types. URL: <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/management/decision-support-system-dss> (дата звернення: 25.05.2025).
17. Decision support system: Components of Decision Support Systems. URL: <https://dssystem.blogspot.com/2010/01/components-of-decision-support-systems.html> (дата звернення: 25.05.2025).
18. Decision Support System. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/decision-support-system/> (дата звернення: 25.05.2025).
19. What is IT/Decision Support System (IT/DSS) | IGI Global Scientific Publishing. URL: <https://www.igi-global.com/dictionary/health-information-technologybiodefense-needs-to-fight-bio-terrorism/42679> (дата звернення: 25.05.2025).
20. Definition of IT Decision Support - Gartner Information Technology Glossary. URL: <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/it-decision-support> (дата звернення: 25.05.2025).
21. Giarratano, J., Riley, G. *Expert Systems: Principles and Programming*. 3rd ed. Boston: Course Technology, 1998. ISBN 978-0534950538. 624 p.
22. Gupta, Jatinder & Forgionne, Guissepi & Mora, Manuel. (2006). *Intelligent Decision-making Support Systems Foundations, Applications and Challenges*. DOI: 10.1007/1-84628-231-4.
23. Laudon, K. C., & Laudon, J. (2021). *Management Information Systems: Managing the Digital Firm*. London: Pearson. 649 p.
24. Bandyopadhyay, S. (2023). *Decision Support System: Tools and Techniques*. Boca Raton, FL: CRC Press. 394 p.
25. Manglik, R. (2024). *Decision Support System*. [S.l.]: EduGorilla Publication. 410 p.

26. Ricci, F., Rokach, L., & Shapira, B. (2022). Recommender Systems: Techniques, Applications, and Challenges. In F. Ricci, L. Rokach, & B. Shapira (Eds.), *Recommender Systems Handbook* (3rd ed., pp. 1–35). New York: Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-0716-2197-4_1.
27. Sànchez-Marrè, M. (2022). *Intelligent Decision Support Systems*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing. 806 p.
28. Hai-Jew, S. (2024). *Enhancing Automated Decision-Making Through AI*. Hershey, PA: IGI Global. 596 p.
29. Sauter, V. L. *Decision Support Systems for Business Intelligence*. Wiley, 2010. 480 p.
30. Pothuvaal, A. (2025). *Data-Driven Decision Making*.: Educohack Press. 257 p.
31. Mora, Manuel & Forgionne, Guissepi & Gupta, Jatinder. (2002). *Decision-Making Support Systems: Achievements and Challenges for the New Decade*. 300 p.
32. Diasio, S., Agell, N. (2009). The evolution of expertise in decision support technologies: A challenge for organizations, cscwd, pp. 692–697, 13th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design, 2009
33. Олексюк О. С. Системи підтримки прийняття фінансових рішень на мікрорівні. Київ : Наукова думка, 1998. 508 с.
34. Power D. J. A Brief History of Decision Support Systems. URL: <http://dssresources.com/history/dsshhistory.html> (дата звернення: 03.05.2025).
35. Richards, Mark (2020). *Fundamentals of Software Architecture: An Engineering Approach* (1st ed.). O'Reilly Media. ISBN 978-1492043454. 442 p.
36. Richards, Mark (2022). *Software Architecture Patterns*. O'Reilly Media, Inc. ISBN 9781098134273. 55 p.
37. Frontend vs Backend Development. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/frontend-vs-backend> (дата звернення: 25.05.2025).
38. Frontend Development. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/front-end-development> (дата звернення: 25.05.2025).
39. Backend Development. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/backend-development> (дата звернення: 25.05.2025).

40. What is polyglot persistence? Definition from WhatIs.com. URL: <https://www.techtarget.com/searchapparchitecture/definition/polyglot-persistence> (дата звернення: 25.05.2025).
41. Difference Between Monolithic Database and Polyglot Persistence. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/difference-between-monolithic-database-and-polyglot-persistence/> (дата звернення: 25.05.2025).
42. Building Web-Based and Inter-Organizational Decision Support Systems. URL: <https://www.managementstudyguide.com/building-web-based-and-inter-organizational-decision-support-systems.htm> (дата звернення: 25.05.2025).
43. Нестеренко О. В., Савенков О. І., Фаловський О. О. Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень: Навч. посібн. / За ред. П.І. Бідюка. Київ: Національна академія управління, 2016. 188 с.
44. Демиденко М. А. Системи підтримки прийняття рішень : навч. посіб. Нац. гірн. ун-т. Електрон. текст. дані. Д. : 2016. 104 с.
45. Decision Lens. URL: <http://www.decisionlens.com> (дата звернення: 25.05.2025).
46. Business Performance Management. URL: <http://bpmsg.com> (дата звернення: 25.05.2025).
47. Online Output. URL: <https://onlineoutput.com> (дата звернення: 25.05.2025).
48. 123ahp. URL: <http://123ahp.com> (дата звернення: 25.05.2025).
49. Expert Choice. URL: <http://expertchoice.com> (дата звернення: 25.05.2025).
50. Super Decisions. URL: <https://superdecisions.com> (дата звернення: 25.05.2025).
51. Spice Logic. URL: <https://www.spicelogic.com/> (дата звернення: 25.05.2025).
52. System Development Life Cycle. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/system-development-life-cycle> (дата звернення: 25.05.2025).
53. Petersen, K., Wohlin, C., Bacc, D. (2009). The Waterfall Model in Large-Scale Development. In: Bomarius, F., Oivo, M., Jaring, P., Abrahamsson, P. (eds) Product-Focused Software Process Improvement. PROFES 2009. Lecture Notes in Business Information Processing, vol 32. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-02152-7_29.

54. C. Larman and V. R. Basili. Iterative and incremental developments. a brief history, in *Computer*, vol. 36, no. 6, pp. 47-56, June 2003, DOI: <https://doi.org/10.1109/MC.2003.1204375>.
55. B. W. Boehm, A spiral model of software development and enhancement, in *Computer*, vol. 21, no. 5, pp. 61-72, May 1988, DOI: <https://doi.org/10.1109/2.59>.
56. What is Agile? Agile Alliance. URL: <https://www.agilealliance.org/agile101> (дата звернення: 25.05.2025).
57. Manifesto for Agile Software Development. Agile Alliance. URL: <https://agilemanifesto.org> (дата звернення: 25.05.2025).
58. SDLC V-Model – Software Engineering. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/software-engineering-sdlc-v-model> (дата звернення: 25.05.2025).
59. Rapid Application Development Model (RAD) – Software Engineering. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/software-engineering-rapid-application-development-model-rad> (дата звернення: 25.05.2025).
60. Єфімов В. В., Оксамитна Л. П., Максимов А. Є., Триус Ю. В. Веб-орієнтований ресурс для проведення групової експертизи методами прийняття рішень. *Тези доповідей VI Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології в освіті, науці і техніці» (ІТОНТ-2022)*, (Черкаси, 23-25 червня 2022 р.) [Електронний ресурс]. Черкаси : ЧДТУ, 2022. С. 37-40. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15540361>.
61. Юрій Триус, Антон Максимов, Віктор Єфімов. Задачі, методи та інформаційні технології прийняття рішень у медичному менеджменті. *Актуальні задачі медичної, біологічної фізики та інформатики*. Матеріали доповідей та виступів всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю 27 квітня 2022 року. Вінниця: Едельвейс. С. 60-65. ISBN 978-617-7237-95-1. URL: https://dSPACE.vnmU.edu.ua/bitstream/handle/123456789/5660/Матеріали%20конференції_Актуальні%20задачі%20медичної%20С%20біологічної%20фізики%20та%20інформатики_27.04.2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y (дата звернення: 25.05.2025).

РОЗДІЛ 2

ІНФОРМАЦІЙНІ СИТУАЦІЇ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В УМОВАХ РИЗИКУ, НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ТА НЕЧІТКОЇ ІНФОРМАЦІЇ

2.1 Інформаційні ситуації прийняття рішень

Розглянемо загальну ситуацію прийняття рішень, коли якість рішення залежить від зовнішніх факторів, на які ОПР (або орган управління) не впливає.

Будемо також вважати, що ці параметри й збурення незмінні в часі, тобто модель є статичною. У роботі Ус С.А., Коряшкіної Л.С. [1] проведено аналіз особливостей такої моделі, визначено її структуру та ключові етапи процесу прийняття рішень, що враховують вплив невизначених факторів.

Ситуацією прийняття рішень називають трійку множин [1]:

$$S = \{\Phi, \Theta, F\}, \quad (2.1)$$

де

$$\Phi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n\} - \quad (2.2)$$

множина можливих рішень (альтернатив) органу управління;

$$\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m\} - \quad (2.3)$$

множина можливих станів середовища E ;

$$F = \{f_{ij}\}_{j=\overline{1,n}, j=\overline{1,m}} - \quad (2.4)$$

оцінний функціонал.

У розгорнутій формі ситуація прийняття рішень S виду (2.1)-(2.4) характеризується матрицею:

	θ_1	θ_2	...	θ_j	...	θ_m
φ_1	f_{11}	f_{12}	...	f_{1j}	...	f_{1m}
φ_2	f_{21}	f_{22}	...	f_{2j}	...	f_{2m}
...
φ_i	f_{i1}	f_{i2}	...	f_{ij}	...	f_{im}
...
φ_n	f_{n1}	f_{n2}	...	f_{nj}	...	f_{nm}

(2.5)

З оцінним функціоналом F виду (2.4) тісно пов'язані такі поняття як *ефективність*, *корисність*, *втрати*, *ризик* та ін. При цьому вибір тієї чи іншої форми функціонала залежить від конкретної задачі управління. Зазвичай використовують дві його форми: ту, що визначає корисність, або ту, що визначає втрати.

Якщо оцінний функціонал F визначає ефективність, корисність, прибуток і т.і., тобто орган управління, приймаючи рішення, виходить з необхідності досягнення його максимуму, то говорять, що він має *додатний інгредієнт* [1]. У цьому випадку оцінний функціонал позначають у такий спосіб [1]:

$$F = F^+ = \{f_{ij}^+\}_{i=\overline{1,n}, j=\overline{1,m}}. \quad (2.6)$$

Коли орган управління виходить із потреби досягнення мінімуму оцінного функціонала (тобто він відображає втрати, ризик), то це означає, що він має *від'ємний інгредієнт*. У цьому випадку оцінний функціонал позначають у такий спосіб [1]:

$$F = F^- = \{f_{ij}^-\}_{i=\overline{1,n}, j=\overline{1,m}}. \quad (2.7)$$

Виходячи із зазначених припущень, процес прийняття рішень в умовах невизначеності може бути описаний такою схемою [1]:

1. Формування множини можливих рішень (альтернатив) органу управління:

$$\Phi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n\},$$

одне з яких необхідно вибрати в залежності від стану середовища E з множини станів:

$$\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m\};$$

2. Визначення та задання основних показників ефективності й корисності, які входять до розрахунку оцінного функціонала:

$$F = \{f_{ij}\}_{i=\overline{1,n}, j=\overline{1,m}},$$

де величини $f_{ij} = f(\varphi_i, \theta_j)$, $i = \overline{1,n}$, $j = \overline{1,m}$, характеризують «виграш» або «програш» органу управління при виборі ним рішення φ_i , $i = \overline{1,n}$, якщо середовище E буде перебувати (або перебуває) в стані θ_j , $j = \overline{1,m}$;

3. Визначення органом управління інформаційної ситуації, яка описує стратегію поведінки середовища E , що описується множиною взаємовиключних станів θ , і може перебувати в одному з них, однак на момент прийняття рішення органу управління *невідомо*, у якому саме стані воно перебуває (або буде перебувати);

4. Вибір критерію (методу) прийняття рішень із множини критеріїв (методів), які характеризують визначену органом управління інформаційну ситуацію;

5. Прийняття рішення за обраним критерієм (методом).

Інформаційною ситуацією прийняття рішень називають ступінь градації невизначеності у виборі середовищем E своїх станів із заданої множини θ в момент прийняття рішення органом управління [1].

На основі роботи [1] побудовано таблицю, що систематизує основні інформаційні ситуації, які виникають під час прийняття рішень (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Інформаційні ситуації прийняття рішень [розроблено на основі [1]]

	Назва ситуації	Опис ситуації
I_1	Прийняття рішень в умовах ризику	Задано розподіл апіорних ймовірностей на елементах множини станів θ середовища E
I_2	Прийняття рішень з невідомими параметрами ймовірностей	Задано розподіл ймовірностей, але параметри невідомі
I_3	Прийняття рішень з лінійними відношеннями порядків на компонентах розподілу	Задано лінійні відношення порядків між елементами апіорного розподілу станів середовища E
I_4	Прийняття рішень в умовах невизначеності	Розподіл ймовірностей на множині станів θ середовища E невідомий
I_5	Прийняття рішень в умовах конфлікту	Наявність антагоністичних інтересів середовища E в процесі прийняття рішення
I_6	Прийняття рішень між умовами ризику та умовами конфлікту	Проміжний випадок між ситуацією ризику та конфлікту
I_7	Прийняття рішень в умовах нечіткої інформації	Існування нечіткої множини станів середовища E

Аналіз джерел [1-6] дає можливість описати особливості інформаційних ситуацій прийняття рішень $I_1 - I_7$.

Разом з тим, у дисертаційному дослідженні задачі прийняття рішень аналізуються в інформаційних ситуаціях I_1 , I_4 та I_7 . Вибір саме цих трьох інформаційних ситуацій обумовлений прагненням охопити різні рівні доступності та точності інформації, що забезпечує комплексний підхід до аналізу процесів прийняття рішень у межах даного дослідження.

Тому спочатку розглянемо інформаційні ситуації I_1 , I_4 та I_7 , що обумовлено їх відповідністю поставленим у дисертації завданням.

Інформаційна ситуація I_1 (*прийняття рішень в умовах ризику*) є базовою для багатьох задач управління, економіки та технічних систем, оскільки передбачає наявність достовірної апріорної інформації про ймовірності виникнення можливих станів Θ середовища E . Така ситуація виникає у випадках, коли існують статистичні дані або обґрунтовані експертні оцінки щодо частоти настання різних подій. Прийняття рішень в умовах ризику дозволяє враховувати ймовірнісний характер наслідків альтернативних рішень, що дає змогу застосовувати методи багатокритеріального прийняття рішень, методи оцінювання ефективності варіантів, а також інструменти теорії оптимізації. Дослідження такої ситуації спрямоване на вибір альтернативи, яка забезпечує найкращий результат з урахуванням відомих ризиків, мінімізуючи потенційні втрати та/або максимізуючи очікуваний прибуток за наявних обмежень.

Зауважимо, що ситуацію прийняття рішень в умовах ризику, по аналогії з (2.1)-(2.5), формально можна представити так:

$$S = \{\Phi, \Theta, P, F\}, \quad (2.8)$$

де $\Phi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m\}$ – множина можливих рішень (альтернатив) органу управління;

$\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$ – множина можливих станів середовища E ;

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\} - \quad (2.9)$$

ймовірності виникнення можливих станів Θ середовища E , при цьому

$$p_j = p(\theta_j) -$$

ймовірність настання стану θ_j середовища E , $j = \overline{1, n}$, які задовольняють умову:

$$p_j \in [0; 1], \quad \sum_{j=1}^M p_j = 1; \quad (2.10)$$

$F = \{f_{ij}\}_{i=\overline{1, n}, j=\overline{1, m}}$ – оцінний функціонал.

У розгорнутій формі ситуація прийняття рішень S виду (2.8) характеризується матрицею:

Θ	θ_1	θ_2	...	θ_j	...	θ_m
P	p_1	p_2	...	p_j	...	p_m
φ_1	f_{11}	f_{12}	...	f_{1j}	...	f_{1m}
φ_2	f_{21}	f_{22}	...	f_{2j}	...	f_{2m}
...
φ_i	f_{i1}	f_{i2}	...	f_{ij}	...	f_{im}
...
φ_n	f_{n1}	f_{n2}	...	f_{nj}	...	f_{nm}

(2.11)

Інформаційна ситуація I_4 (прийняття рішень в умовах невизначеності) є характерною для тих випадків, коли апіорні ймовірності виникнення можливих станів Θ середовища S невідомі або їх неможливо оцінити через обмеженість або відсутність інформації. Ця ситуація відображає реалії багатьох управлінських, економічних і соціальних задач, де рішення потрібно приймати за умов неповної інформації. Дослідження такої ситуації дозволяє розробляти підходи, орієнтовані на мінімізацію ризиків та можливих втрат при відсутності статистичних даних.

Формально ситуація прийняття рішень в умовах невизначеності може бути представлена співвідношенням (2.1)-(2.7).

Інформаційна ситуація I_7 (прийняття рішень в умовах нечіткої інформації) відповідає сучасним викликам, пов'язаним з використанням якісної або неповної інформації, що не піддається точній кількісній оцінці. У багатьох сферах діяльності дані описуються суб'єктивними оцінками експертів, лінгвістичними термами або нечіткими поняттями. Використання моделей нечіткої логіки дозволяє

формалізувати та врахувати таку інформацію, підвищуючи адаптивність та ефективність прийнятих рішень.

Ситуацію прийняття рішень в умовах нечіткої інформації формально також можна представити співвідношеннями (2.1)-(2.7), де в оцінному функціоналі F виду (2.4) величини $f_{ij} = f(\varphi_i, \theta_j)$ є *нечіткими оцінками*, що характеризують «виграш» або «програш» органу управління при виборі ним рішення φ_i , $i = \overline{1, n}$, якщо середовище буде перебувати (або перебуває) в стані θ_j , $j = \overline{1, m}$, представлені в одній з відомих форм нечітких величин, зокрема у вигляді трикутних, чи трапецієвидних нечітких чисел, або лінгвістичних оцінок:

$$f_{ij} = \mu_{ij} = \mu(\varphi_i, \theta_j), i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}. \quad (2.12)$$

Коротко проаналізуємо особливості інформаційних ситуацій I_2 , I_3 , I_5 та I_6 .

Інформаційна ситуація I_2 (*прийняття рішень з невідомими параметрами ймовірностей*) передбачає наявність статистичних даних або можливість оцінювання ймовірностей через процедури статистичної ідентифікації. У рамках даного дослідження акцент робиться на випадках, коли така інформація або відсутня, або має нечіткий, лінгвістичний характер.

Інформаційна ситуація I_3 (*прийняття рішень з лінійними відношеннями порядків на компонентах розподілу*) орієнтована на задачі, де існують чіткі порівняння або ранжування між можливими станами, але відсутні числові оцінки ймовірностей.

Інформаційна ситуація I_5 (*прийняття рішень в умовах конфлікту*) описує ситуацію антагоністичної взаємодії, характерну для ігор з нульовою сумою та конфліктних стратегічних взаємодій.

Інформаційна ситуація I_6 (*прийняття рішень між умовами ризику та умовами конфлікту*) розглядає проміжний випадок, коли середовище частково реагує на дії особи, що приймає рішення. Такий підхід актуальний у задачах стратегічного планування з активним середовищем, проте виходить за межі дослідження, орієнтованого на пасивне середовище з нечіткими чи невизначеними даними.

У роботі не розглядаються моделі і методи прийняття рішень в інформаційних ситуаціях I_2 , I_3 , I_5 та I_6 , оскільки вони виходять за межі завдань, поставлених у дисертаційному дослідженні.

Отже, вибір інформаційних ситуацій прийняття рішень в умовах ризику I_1 , невизначеності I_4 та нечіткої інформації I_7 обумовлений прагненням дослідити прийняття рішень за різних рівнів доступності та чіткості інформації без акценту на протидію чи стратегічну взаємодію із середовищем.

2.2 Загальна постановка задачі багатокритеріального прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації

Актуальність задач багатокритеріального прийняття рішень (Multi-Criteria Decision Making, MCDM) полягає в тому, що в реальних умовах управління, планування та аналізу часто доводиться враховувати множину суперечливих критеріїв, які впливають на вибір найкращого рішення. Це особливо важливо в умовах невизначеності, коли необхідно знаходити компроміс між різними показниками ефективності, такими як витрати, якість, ризику та стійкість системи. Методи багатокритеріального аналізу дозволяють не лише формалізувати процес вибору, але й забезпечують обґрунтованість рішень, підвищуючи їхню ефективність і об'єктивність. Застосування сучасних методів та інформаційних технологій у багатокритеріальному прийнятті рішень сприяє автоматизації процесу ухвалення рішень, що є ключовим чинником у складних і динамічних системах.

Питанням багатокритеріального прийняття рішень присвячені наукові праці вітчизняних науковців таких, як Ситник В. Ф. [2], Волошин О. Ф., Мащенко С. О. [3], Бідюк П. І., Коршевнік Л. О. [4, 5], Гожий О. П. [5], Снитюк В. Є., Гнатієнко Г. М. [6], Кігель В. Р. [7], Ус С. А., Коряшкіна Л. С. [1], Демиденко М. А [8].

Задача багатокритеріального прийняття рішень полягає в оцінці та виборі найкращої альтернативи з множини можливих варіантів

$$A = \{A_1, A_2, \dots, A_N\}, \quad (2.13)$$

враховуючи множину критеріїв

$$C = \{C_1, C_2, \dots, C_M\}, \quad (2.14)$$

що характеризують ці альтернативи.

Деякі критерії можуть бути критеріями вигоди (чим більше значення, тим краще), позначимо множину цих критеріїв як

$$C_{max} = \{C_1, C_2, \dots, C_P\}, \quad (2.15)$$

де P – кількість критеріїв вигоди (максимізації) ($0 \leq P \leq M$), а інші критерії є критеріями втрат (чим менше значення, тим краще), позначимо множину цих критеріїв як

$$C_{min} = \{C_{P+1}, C_{P+2}, \dots, C_M\}, \quad (2.16)$$

при цьому кількість критеріїв втрат (мінімізації) дорівнює $M - P$.

Окрім того, кожен критерій C_j має свою вагу w_j , $j = \overline{1, M}$, при цьому

$$w_j \in [0; 1], \sum_{j=1}^M w_j = 1. \quad (2.17)$$

Ефективність кожної альтернативи A_i ($i = \overline{1, N}$) оцінюється відносно кожного критерію C_j ($j = \overline{1, M}$) за допомогою значення відповідної функції корисності $f_j(A_i, w_j, x_{ij})$, де $x_{ij} \in X_j$ – оцінка значення критерію C_j по відношенню до альтернативи A_i ($i = \overline{1, N}$) з урахуванням ваги w_j ($j = \overline{1, M}$); X_j – допустима множина значень оцінок кожної альтернативи A_i для кожного критерію C_j в певних одиницях вимірювання. Тоді формально задачу MCDM можна записати так:

$$\begin{cases} \max_{A_i \in A} f_j(A_i, w_j, x_{ij}), & j = \overline{1, P}, \\ \min_{A_i \in A} f_j(A_i, w_j, x_{ij}), & j = \overline{P+1, M}. \end{cases} \quad (2.18)$$

Розв'язком задачі (2.18) є альтернатива $A^* \in A$, яка задовольняє умову:

$$A^* = \begin{cases} \arg \max_{A_i \in A} f_j(A_i, w_j, x_{ij}), & j = \overline{1, P}, \\ \arg \min_{A_i \in A} f_j(A_i, w_j, x_{ij}), & j = \overline{P+1, M}. \end{cases} \quad (2.19)$$

Альтернативу A^* виду (2.19) можна вважати ідеальним рішенням задачі (2.18), яке на практиці можна знайти лише наближено.

Покажемо, що задачі прийняття рішень в інформаційних ситуаціях I_1, I_4, I_7 з формальної точки зору є частинними випадками загальної задачі багатокритеріального прийняття рішень.

1. Будемо вважати, що множині альтернатив A виду (2.13) відповідає множина можливих рішень (альтернатив) органу управління Φ виду (2.2), при цьому $N = n$.

2. Для інформаційної ситуації прийняття рішень в умовах ризику (I_1), що описується співвідношеннями (2.5), (2.6), множину критеріїв C (2.14) можна інтерпретувати як множину можливих сценаріїв, або множину варіантів можливих станів Θ (2.3) середовища E , що залежать від зовнішніх умов, тобто формально можна вважати, що $C = \Theta$ і $M = m$.

Оскільки кожен варіант зовнішніх умов θ_j має ймовірність виникнення ризику p_j , що задовольняє (2.10), то в позначеннях загальної постановки задачі (2.13)-(2.19) з урахуванням (2.17) будемо вважати, що

$$w_j = p_j, j = \overline{1, M}. \quad (2.20)$$

3. Для інформаційної ситуації прийняття рішень в умовах невизначеності (I_4), що описується співвідношеннями (2.1)-(2.7), також формально можна вважати, що $C = \Theta$ і $M = m$.

Для інформаційної ситуації I_4 можна вважати, що ваги w_j в (2.17) задовольняють умову:

$$w_j = 1/M, j = \overline{1, M}, \quad (2.21)$$

тобто всі критерії C_j мають однакову вагу, відповідно всі стани середовища θ_j є рівно ймовірними ($j = \overline{1, M}$).

4. Якщо для інформаційних ситуацій I_1, I_4 та I_7 оцінний функціонал F виду (2.4) визначає ефективність, корисність, прибуток і т.і., тобто орган управління, приймаючи рішення, виходить з необхідності досягнення його максимуму $F = F^+$ (2.6), то можна вважати, що множина критеріїв C (2.14) задачі MCDM співпадає з множиною C_{max} виду (2.15), при цьому

$$f_j(A_i, w_j, x_{ij}) = f_{ij}^+, i = \overline{1, N}, j = \overline{1, M}. \quad (2.22)$$

Коли орган управління виходить із потреби досягнення мінімуму оцінного функціонала F виду (2.4), тобто він відображає втрати, ризик, то $F = F^-$ (2.7) і можна вважати, що множина критеріїв C (2.14) задачі MCDM співпадає з множиною C_{min} виду (2.16), при цьому

$$f_j(A_i, w_j, x_{ij}) = f_{ij}^-, i = \overline{1, N}, j = \overline{1, M}. \quad (2.23)$$

Враховуючи сказане, можна вважати, що математичні моделі задач прийняття рішень в інформаційних ситуаціях I_1 (2.8)-(2.11), I_4 (2.1)-(2.7), I_7 (2.8)-(2.11), (2.12) з точністю до позначень виду (2.20)-(2.23) є частинними випадками задачі MCDM виду (2.13)-(2.19).

2.3. Концептуальна модель прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації

Розглянемо концептуальну модель, яка відображає взаємозв'язок між інформаційними ситуаціями I_1 , I_4 та I_7 , що можуть виникнути під час прийняття рішень, тобто взаємозв'язок між інформаційною ситуацією прийняття рішень в умовах ризику (Risk, R), інформаційною ситуацією прийняття рішень в умовах повної невизначеності (Uncertainty, U) та інформаційною ситуацією прийняття рішень в умовах нечіткої інформації (Fuzzy, F).

Запропоновану модель «R-U-F» можливих ситуацій прийняття рішень у відповідних інформаційних ситуаціях I_1 , I_4 , I_7 , представимо у вигляді діаграми Венна (рис. 2.1), що дозволяє наочно представити можливі ситуації прийняття рішень, що значно полегшує ідентифікацію характеру задачі прийняття рішень та обґрунтування вибору відповідних методів її розв'язання.

Модель «R-U-F» можливих ситуацій прийняття рішень дозволяє класифікувати відомі та створювати нові методи багатокритеріального прийняття рішень відповідно до типу ситуації.

Також наведена модель може слугувати основою для розробки адаптивної інформаційної технології, що надає можливість обирати або комбінувати методи в

залежності від наявності в задачі прийняття рішень, що розв'язується, R, U, F-факторів.

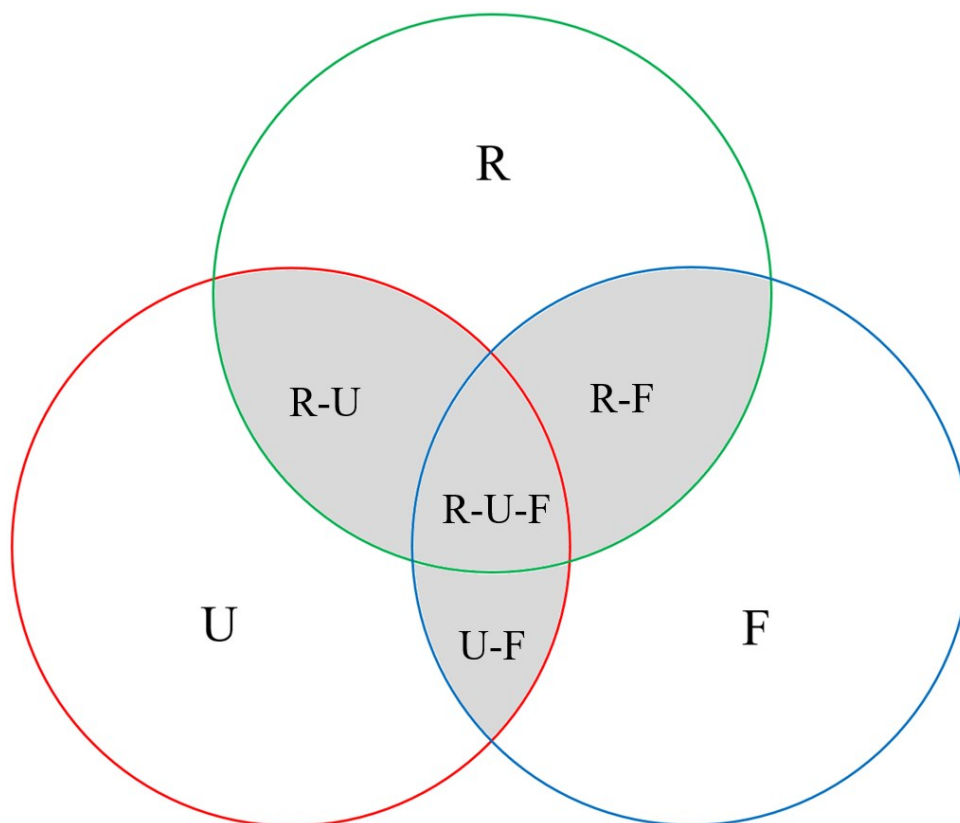


Рисунок 2.1 – Модель «R-U-F» можливих ситуацій прийняття рішень
[розроблено автором]

Наведемо опис компонентів моделі R-U-F, які перетинаються:

- *ризик і невизначеність (R-U)*: будь-який ризик є проявом невизначеності, але не завжди невизначеність веде до ризику. Наприклад, часткова наявність статистичних даних при відсутності повної впевненості в параметрах. Перетин R-U показує, що ризик є кількісним аспектом невизначеності і відповідає ситуації часткової невизначеності;
- *ризик і нечітка інформація (R-F)*: нечітка інформація може збільшувати ризик, оскільки ускладнює точну оцінку ймовірностей та наслідків подій. Наприклад, рішення з ймовірнісними оцінками, але нечіткими критеріями чи результатами;
- *невизначеність і нечітка інформація (U-F)*: нечітка інформація підвищує рівень невизначеності, оскільки ускладнює прийняття рішень. У даному

випадку це означає повну відсутність визначеності в умовах нечіткої інформації;

- *ризик, невизначеність і нечітка інформація (R-U-F)*: найбільш складний випадок, коли присутні всі три інформаційні ситуації прийняття рішень. Спільна зона трьох інформаційних ситуацій свідчить про те, що наявність нечіткої інформації водночас підвищує рівень невизначеності та ризику.

Перетини компонентів моделі R-U-F відображають зв'язки між інформаційними ситуаціями прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації.

Оскільки ризик єдиний із компонентів моделі R-U-F, який піддається кількісному вимірюванню та оцінюванню, постає завдання аналізу наявних засобів управління ризиками. Результати такого аналізу наведено в підпункті 3.2.

Розглянемо модель процесу прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації, що відповідає запропонованій концептуальній моделі R-U-F можливих ситуацій прийняття рішень (рис. 2.2).

Ключовими особливостями моделі процесу прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації є:

1. Універсальність – модель враховує різноманітні комбінації інформаційних ситуацій (R, U, F та їх комбінації), що дозволяє охопити широкий спектр практичних задач;
2. Гнучкість – наявність декількох категорій методів забезпечує можливість адаптації до специфічних умов задач;
3. Інтегративність – при використанні кількох методів результат агрегується, що підвищує надійність остаточного рішення.

Ця модель повністю відображає логіку побудови інформаційної технології для багатокритеріального прийняття рішень у складних умовах і може бути використана як основа для реалізації систем підтримки прийняття рішень у різних галузях.

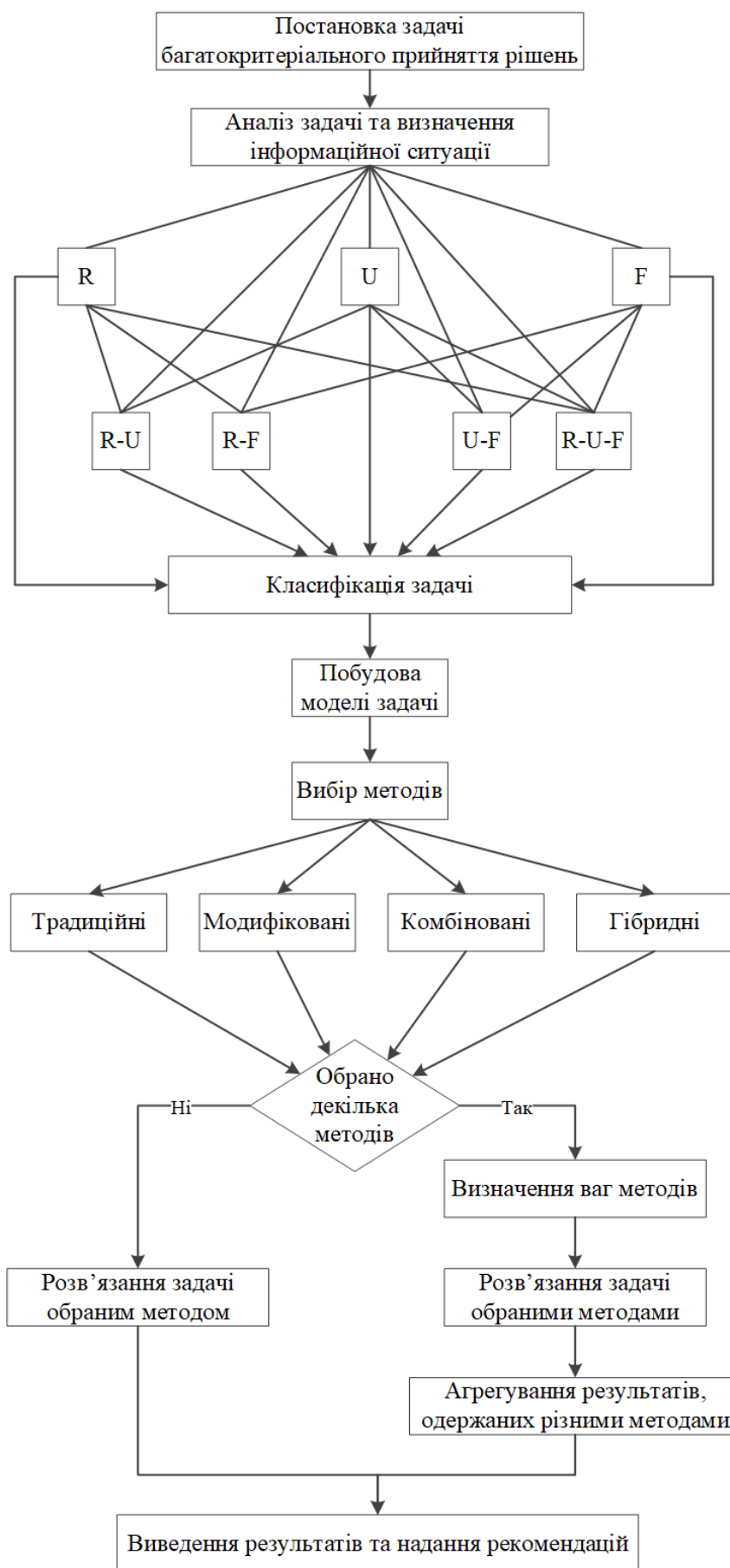


Рисунок 2.2 – Модель процесу прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації [розроблено автором]

Розглянемо основні етапи реалізації моделі процесу прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації, що відповідає запропонованій концептуальній моделі R-U-F можливих інформаційних ситуацій прийняття рішень.

Етап 1. Постановка задачі багатокритеріального прийняття рішень. Цей етап визначає контекст і умови, в яких приймається багатокритеріальне рішення. Правильно сформульована задача є запорукою ефективності наступних аналітичних і обчислювальних процедур. Основні кроки формулювання задачі наведено далі.

Крок 1.1. Визначення мети прийняття рішення. Найпершим завданням є чітке визначення основної мети (або комплексу цілей), досягнення якої (яких) необхідне в рамках проблемної ситуації, тобто мета може бути як одноцільовою, так і багатоцільовою.

Крок 1.2. Визначення множини альтернатив. На цьому кроці описується сукупність можливих альтернативних рішень, які розглядаються у процесі вибору. Альтернативи можуть бути дискретними (наприклад, конкретні варіанти рішень) або безперервними (коли рішення належить певному діапазону значень).

Крок 1.3. Визначення обмежень і допустимої області прийняття рішень. На цьому кроці формулюються обмеження, що відповідають умові задачі. Це можуть бути:

- жорсткі обмеження (наприклад, бюджетні обмеження, технічні вимоги);
- нечіткі обмеження (наприклад, прийнятні межі ризику, що описуються через нечіткі множини).

На цьому кроці важливим є визначення допустимої області, яка окреслює простір можливих рішень.

Крок 1.4. Визначення множини критеріїв. Багатокритеріальна задача передбачає наявність кількох критеріїв, за якими оцінюються альтернативи. При цьому, ці критерії можуть бути:

- кількісними або якісними;
- рівно важливими, або мають перевагу по відношенню один до одного;

- сумісними (тобто такими, що дозволяють порівнювати різні альтернативи на основі однієї шкали або у спільному контексті).

Етап 2. Аналіз задачі та визначення інформаційної ситуації прийняття рішень. Цей етап об'єднує два важливих завдання: глибокий аналіз задачі та визначення інформаційної ситуації прийняття рішень. Метою цього етапу є детальне дослідження вихідних даних, вимог і умов задачі для того, щоб створити повне уявлення про проблему та її контекст. Це дозволяє закласти основу для наступних етапів і забезпечити її релевантність і відповідність реальним умовам.

Завдання 2.1. Аналіз задачі. Це завдання спрямоване на всебічне дослідження задачі, що розв'язується, з метою її чіткого розуміння та визначення ключових параметрів і передбачає виконання кількох кроків:

Крок 2.1.1. Аналіз цілей і завдань. На цьому кроці визначається галузь або сфера, у межах якої виникла задача, окреслюється конкретна проблема, яка потребує вирішення, аналізуються основні цілі задачі, які будуть визначати напрям прийняття рішень, наприклад: підвищення ефективності, мінімізація витрат, зменшення ризиків тощо.

Крок 2.1.2. Виявлення зацікавлених сторін. Встановлюються суб'єкти, яких стосується задача (керівництво компанії, державні органи, громадськість тощо) і чий інтереси можуть впливати на критерії та вибір рішень.

Крок 2.1.3. Оцінка складності та структури задачі. Аналізується характер альтернатив (дискретні або безперервні), кількість критеріїв, наявність багаторівневої структури завдання, можливі конфлікти між критеріями.

Крок 2.1.4. Визначення обмежень. Виокремлюються обмеження, що впливають на задачу.

Завдання 2.2. Визначення інформаційної ситуації прийняття рішень. Це завдання полягає у визначенні характеру наявної інформації щодо альтернатив, критеріїв та середовища прийняття рішення. У цьому завданні відбувається ідентифікація типу та виду інформаційної ситуації прийняття рішень. Враховуються як окремі види цих ситуацій (R, U, F), так і їх комбінації (R-U, R-F, U-F, R-U-F). Аналіз інформаційної ситуації прийняття рішень дозволяє:

- уникнути помилкового застосування методів, що не відповідають реальним умовам задачі;
- забезпечити адекватність моделі задачі реальній ситуації;
- реагувати на зміни в інформаційному середовищі через можливість повторного аналізу.

Вирішення цього завдання дозволяє чітко структурувати основні складові задачі, врахувати наявні обмеження та умови ризику, невизначеності й нечіткої інформації, що впливають на ухвалення рішення. Це завдання має на меті визначення наявної інформації щодо ситуації, що дозволяє формувати на її основі обґрунтовану стратегію для подальших дій. Визначення ситуації зазвичай передбачає виявлення та оцінку основних чинників, що впливають на ухвалення рішення, а також ступеня впевненості або ризику, пов'язаного з кожним з них. Після аналізу здійснюється фіксація визначеної інформаційної ситуації, що надає можливість виконувати подальші дії. Це завдання передбачає виконання наступних кроків.

Крок 2.2.1. Оцінка доступної інформації. На цьому кроці важливо оцінити, які саме дані наявні для аналізу. Це можуть бути статистичні дані, експертні оцінки, попередній досвід або фактичні спостереження. Якщо інформація неповна або нечітка, слід вказати, в чому саме полягає її невизначеність або нечіткість. Це допоможе в подальшому прийнятті обґрунтованих рішень і врахуванні ризиків.

Крок 2.2.2. Класифікація типу вхідної інформації. На цьому кроці визначаються типи інформації, з якими працюватиме модель:

- чітка інформація – коли всі параметри ситуації відомі точно;
- нечітка інформація – коли є неясність або нечіткість у визначенні параметрів, що вимагає застосування нечіткої логіки;
- інформація з елементами невизначеності – коли йдеться про відсутність достатньої кількості даних або про невизначеність щодо можливих наслідків конкретних альтернатив;

- інформація з елементами ризику – коли відома ймовірність різних станів зовнішніх умов, до яких можна застосувати статистичний або інший вид аналізу для оцінки ймовірностей.

Крок 2.2.3. Ідентифікація критичних параметрів і факторів. Після визначення типу інформації важливо визначити ключові фактори, які можуть впливати на процес прийняття рішень. Це можуть бути як внутрішні, так і зовнішні фактори. Кожен із факторів необхідно аналізувати щодо їх впливу на вибір альтернативних рішень.

Крок 2.2.4. Визначення рівня впевненості в даних. Важливим кроком є визначення ступеня надійності даних, що дозволяє відрізнити важливі та менше значущі аспекти ситуації. Це особливо важливо при використанні нечіткої або неповної інформації.

Крок 2.2.5. Створення контексту для формулювання задачі. Завершальним кроком цього завдання є створення інформаційного контексту для наступних кроків. Це означає чітке розуміння інформаційної ситуації прийняття рішень з усіма її параметрами та чинниками, що дозволяє точно сформулювати проблему та визначити, які саме дії будуть найбільш ефективними. Контекст включає в себе як інформаційний, так і ситуаційний аспекти, що створюють основу для ухвалення рішень.

Етап 3. Класифікація задачі. В результаті виконання попередніх етапів фіксується належність задачі до певного типу та виду інформаційних ситуацій прийняття рішень.

Етап 4. Побудова моделі задачі. На цьому кроці створюється модель задачі виду (2.18), для якої альтернативу A^* виду (2.19) можна вважати ідеальним рішенням.

Етап 5. Вибір методів. На цьому етапі здійснюється вибір одного або кількох методів, які найбільш адекватно відображають специфіку задачі, враховують тип інформації, умови ризику та невизначеності, а також вимоги до точності, надійності та швидкості одержання результатів. Для розв'язання задач багатокритеріального прийняття рішень застосовуються методи, які

класифікуються за такими групами (табл. 2.2) [11-13]: традиційні методи; модифіковані методи; комбіновані методи; гібридні методи.

Етап 6. Аналіз кількості обраних методів. Якщо обрано один метод для розв'язання задачі, тоді виконується крок 6.1. Якщо обрано більше одного методу, то виконується крок 6.2.

Крок 6.1. Якщо обрано один метод для розв'язання поставленої задачі, то у такому випадку користувач за допомогою інформаційних технологій послідовно здійснює розв'язання задачі за обраним методом і здійснюється перехід до етапу 7.

Крок 6.2. Якщо обрано більше одного методу, то здійснюється виконання наступних підкроків.

Підкрок 6.2.1. Визначення ваг методів. Визначення ваг методів дозволяє кількісно оцінити їхню відносну значущість та узгодити їхній внесок у загальне рішення. Деякі методи визначення ваг наведено в формулах (2.27)-(2.32).

Підкрок 6.2.2. Розв'язання задачі обраними методами. Користувач за допомогою інформаційних технологій послідовно здійснює розв'язання задачі за кожним із обраних методів. На цьому підкроці інформаційна технологія повинна завантажувати вхідну інформацію для кожної задачі та, при потребі, адаптувати її до вимог конкретних класів методів. Зокрема, для методів, що працюють в умовах нечіткої інформації, необхідно виконати фазифікацію даних, тобто перевести чіткі значення у нечіткий формат на основі апарату нечітких множин. У випадках, коли вхідна інформація вже задана в нечіткому вигляді, але застосовуються методи, які не мають інтегрованого апарату нечітких множин, необхідно здійснити дефазифікацію даних, тобто перевести нечіткі оцінки у чіткі значення.

Підкрок 6.2.3. Агрегування результатів, одержаних різними методами. На цьому кроці здійснюється інтеграція результатів, одержаних різними методами прийняття рішень, в єдине узгоджене рішення, що враховує вплив кожного методу відповідно до визначених ваг. Результати кожного методу можуть бути представлені у різних масштабах (рейтинги, значення функції корисності, нечіткі оцінки тощо). Для забезпечення коректного агрегування здійснюється їх приведення до спільної уніфікованої шкали (наприклад, нормалізація в межах

[0;1]). Потім результати кожного методу множаться на відповідний ваговий коефіцієнт, що відображає його значущість у загальній моделі прийняття рішень. Це дозволяє забезпечити баланс між методами з різною впливовістю на прийняття рішення.

Етап 7. Виведення результатів та надання рекомендацій. Система генерує рекомендації щодо вибору найкращої альтернативи на основі результатів обчислень, виконаних на попередніх етапах. Формування рекомендацій базується на результатах застосування методів прийняття рішень, обраних користувачем, які можуть бути представлені у вигляді вектору пріоритетів, рангів, тощо. Надання рекомендацій завершує цикл прийняття рішення, переводячи формалізовані розрахунки у практичні кроки.

Для кращого розуміння використання методів прийняття рішень важливо розрізняти їхні види залежно від способу застосування, модифікації чи поєднання. Зокрема, варто виділити такі поняття, як традиційні, модифіковані, комбіновані та гібридні методи. На основі аналізу джерел [11-22] наведемо основні ознаки кожного з них у контексті прийняття рішень.

Традиційні методи прийняття рішень – це класичні методи прийняття рішень, що базуються на строгих математичних моделях, логічних правилах або інтуїтивних стратегіях та часто використовуються у конкретних інформаційних ситуаціях прийняття рішень. До них належать методи експертних оцінок, дерева рішень, методи багатокритеріального прийняття рішень. Ці методи залишаються основою для вирішення стандартних задач прийняття рішень, однак їх ефективність знижується у складних і динамічних середовищах.

Модифіковані методи прийняття рішень – це вдосконалені або адаптовані версії традиційних методів прийняття рішень, що враховують нові умови, особливості предметної області або враховують додаткові параметри для підвищення точності і ефективності прийняття рішень.

Комбіновані методи прийняття рішень – це методи, що послідовно або паралельно поєднують кілька різних методів для отримання комплексних рішень зі збереженням автономності кожного з методів.

Гібридні методи прийняття рішень – це методи, що на різних кроках поєднують різні методи для більш гнучкого і адаптивного процесу прийняття рішень.

На основі наведених визначень та проведеного аналізу побудовано порівняльну таблицю класів традиційних, модифікованих, комбінованих та гібридних методів прийняття рішень (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Аналіз характеристик традиційних, модифікованих, комбінованих та гібридних методів прийняття рішень [розроблено автором]

Критерій порівняння	Традиційні методи прийняття рішень	Модифіковані методи прийняття рішень	Комбіновані методи прийняття рішень	Гібридні методи прийняття рішень
Основна особливість	Класичні методи	Адаптовані або вдосконалені версії традиційних методів	Поєднання кількох методів для комплексного підходу	На різних кроках поєднання різних методів
Гнучкість	Обмежена	Середня	Висока	Дуже висока
Сфера застосування	Стандартизовані задачі	Задачі з новими умовами або обмеженнями	Складні багато-критеріальні задачі	Задачі в динамічних умовах прийняття рішень
Переваги	Простота, зрозумілість	Більш точні результати, врахування специфіки задачі	Комплексність підходу до задачі прийняття рішень в різних інформаційних ситуаціях	Адаптивність до різних інформаційних ситуацій прийняття рішень
Недоліки	Не завжди ефективні в складних ситуаціях	Може бути складнішим у реалізації	Підвищена складність, потреба в узгодженості методів	Висока складність, потреба у значних обчислювальних ресурсах

Проведений порівняльний аналіз дозволяє узагальнити ключові характеристики різних класів методів прийняття рішень та виявити основні відмінності між підходами, що в них реалізуються. Також цей аналіз демонструє, що методи прийняття рішень мають різний ступінь складності, адаптивності та застосовності залежно від конкретних завдань і умов.

Отже, вибір конкретного методу прийняття рішень має ґрунтуватися на аналізі характеру задачі, доступних ресурсах і вимогах до точності та швидкості прийняття рішень. Тенденція розвитку сучасних методів свідчить про зростаючу популярність модифікованих, комбінованих і гібридних підходів, що поєднують традиційну основу з новітніми технологіями для досягнення кращих результатів.

2.4 Методи розв’язання задачі багатокритеріального прийняття рішень

Багатокритеріальне прийняття рішень (MCDM) поділяється на дві основні категорії [23, 24]:

1. MODM (Multi-Objective Decision Making, багатоцільове прийняття рішень) є підходом до розв’язання задач оптимізації, при якому вибір рішення здійснюється з множини можливих альтернатив шляхом пошуку компромісу між декількома цільовими функціями. Цей підхід широко застосовується в задачах лінійного та нелінійного програмування, зокрема для оптимізації виробничих процесів, розподілу ресурсів та управління складними системами в умовах багатокритеріальності.

2. MADM (Multi-Attribute Decision Making, багатокритеріальний аналіз альтернатив) – орієнтований на вибір найкращої альтернативи з дискретного набору рішень на основі кількох атрибутів (критеріїв). Це корисно для задач, де необхідно оцінити та ранжувати обмежену кількість варіантів.

Отже, MODM, зазвичай, застосовується в оптимізаційних задачах, а MADM – для оцінки та вибору ефективних альтернатив. Обидва підходи є важливими складовими MCDM і використовуються залежно від конкретної проблеми та наявних вхідних даних [25, 26].

У дослідженні проаналізовано наукові публікації, де описано методи MCDM та їх застосування, з метою оцінки поширеності та значущості методів MCDM у різних предметних сферах, а також для ідентифікації найбільш популярних методів серед цих методів. Аналіз досліджень проведено на основі даних наукової бази «*ScienceDirect*» [27] за період 2014-2024 років із використанням різних ключових слів.

Пошук у науковій базі «ScienceDirect» виявив 15881 публікацію за ключовою фразою «Multi-criteria decision-making» та 12172 публікації за аббревіатурою «MCDM», яка також використовується для позначення методів багатокритеріального прийняття рішень (станом на 11 березня 2025 року).

Відсотковий розподіл досліджень, що стосуються MODM і MADM, наведено на рисунку 2.3. Ці дані отримані шляхом пошуку в базі “ScienceDirect” за ключовими словами «MODM» + «Multi-objective decision-making» (2510 публікацій), «MADM» + «Multi-attribute decision-making» (8483 публікації) станом на 11 березня 2025 року.

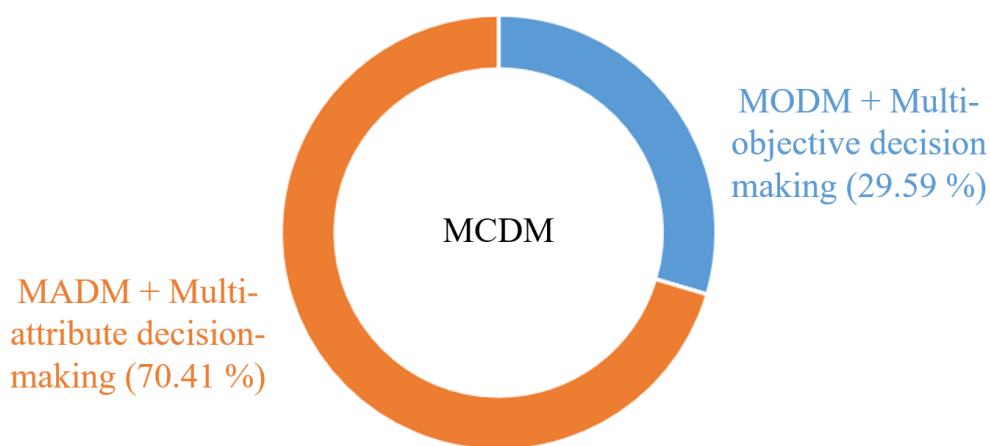


Рисунок 2.3 – Відсоток статей, що відносяться до досліджень методів MODM та MADM [розроблено автором]

Кількісну динаміку наукових публікацій за ключовими словами «Multi-criteria decision-making» представлено на рисунку 2.4, що дозволяє проаналізувати тенденції зростання кількості досліджень у цій галузі протягом обраного періоду.

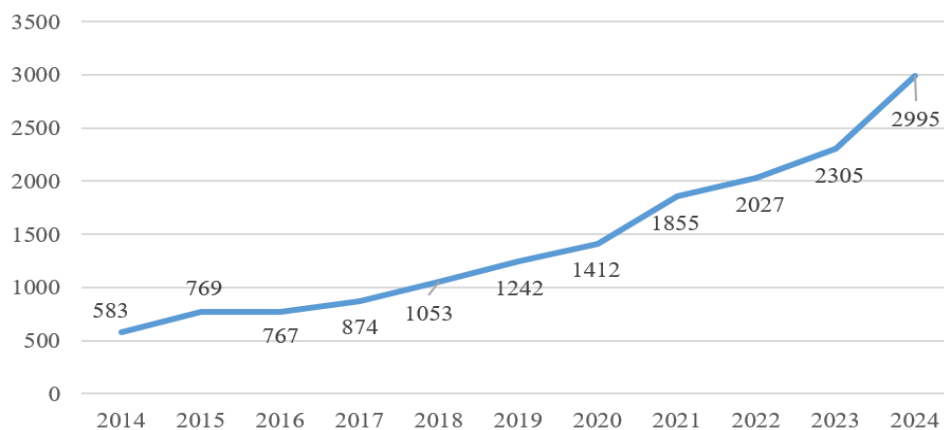


Рисунок 2.4 – Кількість статей за запитом «Multi-criteria decision-making» з 2014 по 2024 рік [розроблено автором]

Рисунок 2.4 чітко демонструє зростання кількості статей у останні роки, що підтверджує популярність методів MCDM у сучасних дослідженнях. Karlinski, O. *et al.* (2019) [28] підкреслює важливість методів MCDM та їхнє стрімке збільшення.

Слід зазначити, що методи MCDM використовуються в різних галузях. На рисунку 2.5 на основі даних наукової бази «*ScienceDirect*» [27] зображено діаграму з кількістю публікацій про застосування методів MCDM за предметними галузями. При цьому деякі статті можуть належати до кількох предметних галузей одночасно.

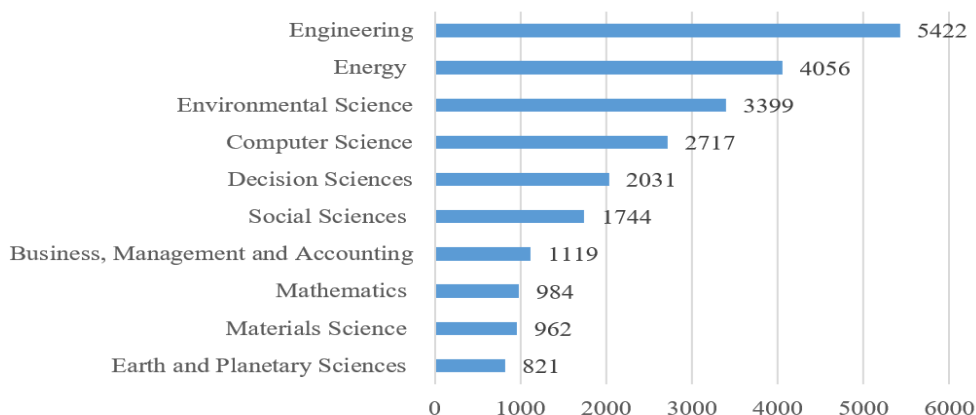


Рисунок 2.5 – Кількість статей за предметними галузями в дослідженнях MCDM
[розроблено автором]

Результати аналізу показують, що методи MCDM застосовуються у широкому спектрі галузей, таких як інженерія, енергетика, науки про довкілля, комп'ютерні науки тощо.

Порівняння підходів MODM і MADM наведено в таблиці 2.3

Таблиця 2.3 – Порівняння підходів MODM і MADM [розроблено на основі [29]]

Критерії порівняння	MODM	MADM
Визначені критерії	Цілі	Атрибути
Визначення мети	Явне	Неявне
Визначення атрибутів	Неявне	Явне
Визначення обмежень	Явне	Неявне
Визначення альтернатив	Неявне	Явне
Кількість альтернатив	Нескінченна, скінченна	Скінченна
Контроль з боку ОПР	Значний	Обмежений
Парадигма моделювання прийняття рішень	Орієнтована на процес	Орієнтована на результат
Розв'язувані задачі	Проектування (планування) / експлуатація	Оцінювання / вибір

Оскільки у дисертаційній роботі досліджуються методи з категорії MADM, тому наведемо опис найбільш популярних за кількістю публікацій методів з цієї категорії (таблиця 2.4).

Таблиця 2.4 – Опис популярних методів MADM [розроблено на основі [30-41]]

Метод	К-сть статей	Опис методу
Analytic Hierarchy Process (AHP)	22962	Використовує ієрархічну структуру та застосовує парні порівняння для визначення пріоритетів альтернатив [30].
Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)	8730	Метод, що базується на виборі альтернативи, яка знаходиться найближче до ідеального рішення та найдалі від антиідеального рішення [31].
Case-Based Reasoning (CBR)	4780	Підхід до прийняття рішень, що ґрунтується на використанні попередніх випадків і аналогій для розв'язання нових задач [32].
Grey analysis: Grey Relational Analysis/Grey Relational Model (GRA/GRM)	4762	Метод аналізу в умовах невизначеності, що ділить інформацію на білу (повністю відому), чорну (повністю невідому) та сіру (частково відому) для оцінювання альтернатив [33].
Analytic Network Process (ANP)	4213	Модифікація АНР, яке дозволяє враховувати взаємозалежності між критеріями та альтернативами за допомогою мережевого підходу [34].
FUZZY AHP	4081	Модифікація АНР, що використовує нечітку логіку для врахування нечіткості та невизначеності в оцінюванні альтернатив [35].
ELimination Et Choix Traduisant la REalité (ELimination Et Choice Translating REality) (ELECTRE)	4014	Метод та його модифікації порівняльного аналізу, що використовує порогові значення для відсіювання слабших альтернатив і допомагає визначити найкращі рішення [36].
Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations (PROMETHEE)	3858	Метод та його модифікації ранжування альтернатив на основі парних порівнянь та визначення переваг для багатокритеріального прийняття рішень [37].
Vlse Kriterijumska Optimizacija i Kompromisno Resenje (VIKOR)	3833	Метод компромісного ранжування, що визначає альтернативу з найменшим відхиленням від ідеального розв'язку, враховуючи баланс між критеріями [38].
FUZZY TOPSIS	3559	Модифікація TOPSIS, що використовує нечітку логіку для врахування нечіткості та невизначеності в оцінюванні альтернатив [39].
Decision making trial and evaluation laboratory (DEMATEL)	2911	Метод аналізу складних взаємозв'язків між критеріями та альтернативами, що дозволяє виявити причинно-наслідкові зв'язки [40].
Preference Ranking Global Frequencies in Multicriterion Analysis (PRAGMA)	2226	Метод, що базується на глобальній частотності переваг для визначення найкращих альтернатив [41].

У таблиці 2.5 наведено результат дослідження, метою якого було співставлення популярних методів MADM за інформаційними ситуаціями прийняття рішень в умовах визначеності, невизначеності, ризику та нечіткої інформації.

Таблиця 2.5 – Систематизація популярних методів MADM за інформаційними ситуаціями прийняття рішень в умовах визначеності, невизначеності, ризику та нечіткої інформації [розроблено автором]

Вид інформаційної ситуації прийняття рішень	Методи
Інформаційна ситуація прийняття рішень в умовах визначеності	AHP, ANP, TOPSIS, ELECTRE, PROMETHEE, VIKOR, DEMATEL, PRAGMA
Інформаційна ситуація прийняття рішень в умовах невизначеності	CBR, GRA/GRM
Інформаційні ситуації прийняття рішень в умовах ризику	GRA/GRM
Інформаційна ситуація прийняття рішень в умовах нечіткої інформації	Fuzzy AHP, Fuzzy TOPSIS

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що класичні методи MADM можуть бути адаптовані для роботи в умовах невизначеності та нечіткої інформації, і це часто досягається шляхом інтеграції концепцій нечіткої логіки, ймовірнісного підходу тощо. Більшість методів MADM є універсальними, тобто можуть бути адаптовані до різних типів інформаційних ситуацій, включаючи прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності і нечіткої інформації.

Порівняємо деякі популярні методи MADM (табл. 2.6), зокрема: A_1 – AHP; A_2 – ANP; A_3 – TOPSIS; A_4 – MOORA; A_5 – методи прийняття рішень в умовах ризику, до яких входять методи, засновані на: критерії Байєса; критерії мінімуму дисперсії оцінного функціонала; комбінованому критерії та інших подібних критеріях (див., наприклад, [1, 6]); A_6 – методи прийняття рішень в умовах повної невизначеності, які включають в себе методи, засновані на: критерії Лапласа, критерії Вальда, критерії Севіджа, критерії Гурвіца, та інших критеріях (див., наприклад, [1, 6]).

При цьому пропонується керуватись такими критеріями K_j ($j = \overline{1,15}$) оцінювання методів MADM згідно з таблицею 2.2:

- K_1 – тип вхідних даних;
- K_2 – наявність нечіткої модифікації;
- K_3 – наявність експертного оцінювання;
- K_4 – пріоритетні галузі застосування;
- K_5 – складність алгоритму (вимірюється від 1 до 10);
- K_6 – чутливість до оцінок (Висока / Середня / Низька);
- K_7 – масштабованість (Висока / Середня / Низька);
- K_8 – інтерпретованість результатів (Висока / Середня / Низька);
- K_9 – вимоги до ОНР (Високі / Середні / Низькі);
- K_{10} – гнучкість у моделях (Висока / Середня / Низька);;
- K_{11} – алгоритм перевірки узгодженості;
- K_{12} – популярність у літературі (Висока / Середня / Низька);
- K_{13} – результат застосування;
- K_{14} – залежність від ваг критеріїв;
- K_{15} – підтримка групового прийняття рішень.

Таблиця 2.6 – Порівняльний аналіз характеристик деяких популярних методів MADM [розроблено автором]

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
K_1	Матриця парних порівнянь	Матриця парних порівнянь	Кількісні дані, Ваги	Кількісні дані	Ймовірності, матриця виграшів / програшів	Виграші / програші, сценарії
K_2	Так	Так	Так	Так	Обмежено	Так
K_3	Так	Так	Є можливість	Є можливість	Так	Так
K_4	Менеджмент, стратегічне планування	Комплексні системи	Інженерія, енергетика	Промисловість, логістика	Економіка, фінанси	Стратегічне планування, прогнозування
K_5	7	9	5	5	6	6
K_6	Висока	Висока	Середня	Низька	Висока	Середня

Продовження таблиці 2.6						
K_7	Середня	Висока	Висока	Висока	Середня	Середня
K_8	Висока	Середня	Висока	Висока	Середня	Середня
K_9	Середні	Високі	Низькі	Низькі	Середні	Високі
K_{10}	Висока	Висока	Середня	Середня	Низька	Висока
K_{11}	Так (CR)	Частково	Ні	Ні	Ні	Ні
K_{12}	Висока	Середня	Висока	Середня	Середня	Середня
K_{13}	Нормований вектор пріоритетів, ранжування	Вектори ваг, глобальні пріоритети (з урахуванням зворотних зв'язків)	Відстань до ідеалу, ранжування альтернатив	Комплексна оцінка, ранжування	Очікувані значення вигравів / програшів	Альтернатива з максимальним min/max, розподіл результатів
K_{14}	Висока	Висока	Середня	Середня	Низька	Низька
K_{15}	Так	Так	Так	Так	Так	Так

У результаті розв'язання задачі багатокритеріального прийняття рішень, як правило, формується нормований вектор пріоритетів (або оцінок альтернатив), що забезпечує можливість їх безпосереднього порівняння між собою.

Попри відмінності в алгоритмічній реалізації, формах представлення результатів та вимогах до вхідних даних, розглянуті методи багатокритеріального прийняття рішень (MADM) спрямовані на розв'язання однакового класу задач – вибору, ранжування або оцінювання альтернатив за сукупністю критеріїв. Завдяки цьому можна порівнювати між собою результати, одержані різними методами, в межах однієї задачі прийняття рішень з метою визначення ефективної альтернативи серед альтернатив на основі їх агрегованої оцінок.

Для досягнення цієї мети можна застосувати підхід агрегування результатів, одержаних різними методами, що описаний в нижче.

2.5 Методика застосування декількох методів багатокритеріального прийняття рішень в межах однієї задачі з агрегуванням результатів

Під час вибору методів розв'язання задачі прийняття рішень, важливо враховувати особливості постановки задачі та вхідних даних, до яких застосовуються відповідні методи. Зокрема, традиційні методи прийняття рішень в

умовах невизначеності та ризику, зокрема віднесені до методів, що увійшли до множин методів A_5 і A_6) явно не застосовуються до розв'язання задач, у яких множина критеріїв одночасно містить як критерії, що підлягають максимізації, так і ті, що підлягають мінімізації. Це зумовлено тим, що ці методи під час розв'язування оперують лише одним із двох типів вхідної інформації – матрицею вигравшів або матрицею програшів. Разом з тим, окремі методи MADM можуть бути адаптовані до розв'язання задач, які, як правило, розв'язуються традиційними методами в умовах ризику чи невизначеності.

Для наочного відображення відмінностей між результатами при застосуванні різних методів, можна розрахувати матрицю відхилень між результатами, одержаними різними методами, наприклад за такою методикою.

Нехай є набір методів M_1, M_2, \dots, M_n . Кожен метод M_q дає свій вектор пріоритетів альтернатив $V_q = (v_i^q)_{i=\overline{1,N}}$, де v_i^q – пріоритет (вага) альтернативи A_i ($i = \overline{1,N}$), отриманий методом M_q ($q = \overline{1,n}$), N – кількість альтернатив, n – кількість методів.

Ці вектори пріоритетів альтернатив можна представити у вигляді матриці пріоритетів:

$$V = \begin{pmatrix} v_1^1 & v_1^2 & \dots & v_1^n \\ v_2^1 & v_2^2 & \dots & v_2^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_i^1 & v_i^2 & \dots & v_i^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_N^1 & v_N^2 & \dots & v_N^n \end{pmatrix}. \quad (2.24)$$

Візьмемо два методи M_X і M_Y , вектори пріоритетів альтернатив V^X і V^Y , які одержані за цими методами відповідно:

$$V^X = \begin{pmatrix} v_1^X \\ v_2^X \\ \dots \\ v_i^X \\ \dots \\ v_N^X \end{pmatrix}, \quad V^Y = \begin{pmatrix} v_1^Y \\ v_2^Y \\ \dots \\ v_i^Y \\ \dots \\ v_N^Y \end{pmatrix}.$$

Щоб порівняти результати застосування двох методів M_X та M_Y , розраховується вектор відхилень $D^{X,Y}$ між векторами пріоритетів альтернатив V^X і V^Y :

$$D^{X,Y} = \begin{pmatrix} |v_1^X - v_1^Y| \\ |v_2^X - v_2^Y| \\ \vdots \\ |v_N^X - v_N^Y| \end{pmatrix} \in R^N, \quad (2.25)$$

або, у векторному вигляді:

$$D^{X,Y} = |V^X - V^Y|, \quad (2.26)$$

де абсолютне значення береться поелементно. Побудований вектор відхилень $D^{X,Y}$ дозволяє визначити, які методи дають схожі результати.

Однакові результати, отримані за допомогою різних методів у межах однієї задачі прийняття рішень, можуть свідчити про коректність їх застосування. Також це може свідчити про компетентність експерта, наприклад коли задача розв'язується методами з різних інформаційних ситуацій. Зокрема, в умовах нечіткої інформації експерту необхідно здійснити фазифікацію вхідних даних, тобто перетворення чітких значень у нечіткі множини. Якщо результати після такого перетворення, отримані з використанням нечітких методів, узгоджуються з результатами, отриманими за чіткими методами, то це може слугувати підтвердженням правильності виконаного перетворення та обґрунтованості експертного підходу. Крім того, це дозволяє оцінити ступінь близькості результатів, отриманих різними методами при розв'язанні однієї задачі, що, у свою чергу, дає підстави для кластеризації методів відповідно до їхньої придатності для певного класу задач.

Для агрегування векторів пріоритетів альтернатив, одержаних кількома методами прийняття рішень, у підсумковий вектор пріоритетів альтернатив необхідно задати процедуру визначення вагових коефіцієнтів, які відображають важливість кожного методу. У дослідженні розглянуто дві процедури визначення вагових коефіцієнтів (ваг) методів:

- визначення вагових коефіцієнтів методів за допомогою експертного оцінювання;
- визначення вагових коефіцієнтів методів з використанням процедури парних порівняння методу аналізу ієрархій.

Розглянемо кожен із запропонованих підходів більш детально.

Для виставлення вагових коефіцієнтів методів можна керуватись критеріями K_j оцінювання методів MADM згідно з таблицею 2.6 ($j = \overline{1,15}$).

1. *Визначення вагових коефіцієнтів методів за допомогою експертного оцінювання.* У даному підході вагові коефіцієнти методів задаються безпосередньо експертом або групою експертів, виходячи з їхньої думки щодо надійності, значущості або релевантності кожного методу в контексті задачі прийняття рішень, що розв'язується.

Позначимо *вектор вагових коефіцієнтів методів* прийняття рішень як

$$w = (w_q)_{q=\overline{1,n}}, \quad (2.27)$$

де w_q – ваговий коефіцієнт q -го методу, $q = \overline{1,n}$, n – кількість методів, при цьому:

$$w_q \in [0; 1], q = \overline{1,n}, \sum_{q=1}^n w_q = 1. \quad (2.28)$$

Серед *переваг* цього підходу: простота застосування; гнучкість у врахуванні специфіки дослідження; можливість оперативної корекції ваг.

Серед *недоліків* цього підходу: високий рівень суб'єктивності; потреба у високої компетентності експерта; складність обґрунтування вибору у науковому контексті без додаткових процедур валідації.

Цей підхід доцільно застосовувати у випадках, коли експерт добре розуміє сильні та слабкі сторони кожного методу, а також контекст задачі.

Зауваження 2.1. Якщо всі методи M_q ($q = \overline{1,n}$) вважати рівно важливими, то їх вагові коефіцієнти w_q дорівнюють:

$$w_q = 1/n, q = \overline{1,n}. \quad (2.29)$$

2. *Визначення вагових коефіцієнтів методів з використанням процедури парного порівняння методу аналізу ієрархій (АНР).* АНР пропонує систематичний підхід для визначення ваг шляхом попарного порівняння методів між собою за критерієм важливості.

Парні порівняння проводяться в термінах домінування одного елемента над іншим. Отримані судження оцінюються за шкалою Сааті [30]. Для матриці парних порівнянь експерт виносить $n(n - 1)/2$ суджень, де n – порядок матриці попарних

порівнянь. У загальному випадку, якщо E_1, E_2, \dots, E_n – множина з n оцінок, то одержується матриця парних порівнянь розмірності $n \times n$ виду [30]:

$$A_{AHP} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.30)$$

де a_{ij} – оцінка важливості методу M_i відносно методу M_j , при цьому:

- 1) якщо $a_{ij} = \alpha$, то $a_{ji} = 1/\alpha$, $\alpha \neq 0$, де α – оцінки за шкалою Сааті;
- 2) якщо елементи E_i і E_j мають однакову відносну важливість, то $a_{ij} = a_{ji} = 1$ зокрема $a_{ii} = 1$, тобто матриця попарних порівнянь A є квадратною додатною обернено-симетричною матрицею.

тобто матриця A_{AHP} є додатною обернено-симетричною квадратною матрицею.

Ранжування елементів, що аналізуються з використанням матриці попарних порівнянь, здійснюється на підставі аналізу головного власного вектору матриці попарних порівнянь W_{AHP} , що відповідає максимальному власному значенню λ_{max} матриці A_{AHP} . Головний власний вектор W_{AHP} забезпечує упорядкування пріоритетів елементів, що порівнюються, а власне значення є *мірою узгодженості (однорідності)* суджень експерта. Головний власний вектор W_{AHP} додатної обернено-симетричної квадратної матриці A_{AHP} задовольняє рівність:

$$AW_{AHP} = \lambda_{max} W_{AHP}, \quad (2.31)$$

де λ_{max} – максимальне власне значення матриці A_{AHP} ,

$W_{AHP} = (w_{AHP1}, w_{AHP2}, \dots, w_{AHPn})^T$ – головний власний вектор матриці A_{AHP} .

Якщо головний власний вектор W_{AHP} нормований, тобто

$$w_{AHPq} \in [0; 1], q = \overline{1, n}, \sum_{q=1}^n w_{AHPq} = 1,$$

то він є вектором пріоритетів для матриці A_{AHP} . Якщо власний вектор W_{AHP} ненормований, то проводиться його нормалізація. Для цього необхідно знайти суму всіх його елементів і утворити новий вектор W'_{AHP} , елементи якого є відношенням елементів вектору W_{AHP} на знайдену суму:

$$W'_{AHP} = (w'_q)_{q=\overline{1,n}}, \text{ де } w'_q = \frac{w_{AHPq}}{\sum_{q=1}^n w_{AHPq}}, q = \overline{1,n}. \quad (2.32)$$

Після цього вектор вагових коефіцієнтів методів w виду (2.27)-(2.28) покладаємо рівним

$$w^T = W'_{AHP}.$$

Вектор вагових коефіцієнтів w^T може бути наближено обчислений спрощеним способом.

Для кожного рядка матриці парних порівнянь (2.30) знаходимо середнє геометричне її елементів:

$$g_i = \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}, i = \overline{1,n}. \quad (2.33)$$

Після цього обчислюємо суму всіх середніх геометричних:

$$G = \sum_{i=1}^n g_i, \quad (2.34)$$

та нормалізуємо кожне геометричне середнє g_i виду (2.33), поділивши його на суму G :

$$w_q = \frac{g_q}{G}, \quad (2.35)$$

де w_q – ваговий коефіцієнт методу M_q , $q = \overline{1,n}$.

Переваги цього підходу:

- забезпечення більшої об'єктивності порівняно з простим експертним оцінюванням;
- підтримує логіку багатокритеріального аналізу;
- підтримує перевірку узгодженості суджень експерта за допомогою відношення однорідності:

$$CR = CI/RI \quad (2.36)$$

де: $CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$ – індекс однорідності (узгодженості) матриці парних порівнянь, n – кількість елементів, що порівнюються між собою; λ_{max} – максимальне власне значення матриці парних порівнянь виду (2.30); RI – середнє значення (математичне сподівання) індексу однорідності випадковим чином складеної матриці попарних порівнянь за шкалою від 1 до 9 обернено-симетричної

матриці з відповідними оберненими величинами елементів, що базується на експериментальних даних [30].

Значення CR (2.36), вважається допустимим, якщо воно не перевищує 0.1. Тому, якщо $CR \leq 0.1$, то матриця парних порівнянь $A_{АНР}$ (2.30) вважається узгодженою. Інакше матриця парних порівнянь $A_{АНР}$ вважається неузгодженою і експерту потрібно повторити процедуру порівняння [34].

Недоліки цього підходу: вимагає більше часу й уваги експерта, особливо при великій кількості методів й критеріїв оцінювання; може виникати проблема поганої узгодженості суджень; потребує складніших обрахунків, зокрема математичної обробки матриці порівнянь та знаходження власних векторів.

Цей підхід є доцільним, якщо важливо забезпечити системність у визначенні ваг, а також у випадках, коли рішення приймаються колегіально в групі експертів.

Після визначення вагових коефіцієнтів w_q методів M_q ($q = \overline{1, n}$), що задовольняють умову, за одним з розглянутих підходів, *агрегований вектор пріоритетів альтернатив* A_i ($i = \overline{1, N}$)

$$S_A = (S_{A_1}, S_{A_2}, \dots, S_{A_N}), \quad (2.37)$$

з урахуванням матриці векторів пріоритетів альтернатив V (2.24), одержаних різними методів прийняття рішень, обчислюється за наступною формулою:

$$S_A = V_{N \times n} \cdot w_{n \times 1}^T, \quad (2.38)$$

при цьому

$$S_{A_i} = \sum_{q=1}^n v_i^q \cdot w_q^T, i = \overline{1, N}, \quad (2.39)$$

де

v_i^q – пріоритет альтернативи A_i ($i = \overline{1, N}$), одержаний методом M_q , ($q = \overline{1, n}$), N – кількість альтернатив, n – кількість методів; $w^T = (w_1^T, w_2^T, \dots, w_n^T)$ – вектор вагових коефіцієнтів методів M_q , ($q = \overline{1, n}$), S_{A_i} – агреговане значення пріоритету альтернативи A_i ($i = \overline{1, N}$).

Якщо всі методи M_q ($q = \overline{1, n}$) вважати рівно важливими, то агрегований вектор пріоритетів альтернатив A_i ($i = \overline{1, N}$) $S_A = (S_1, S_2, \dots, S_N)$ можна знайти із застосуванням середнього геометричного, тобто у цьому випадку:

$$S_{A_i} = \left(\prod_{q=1}^n v_i^q \right)^{1/n}, i = \overline{1, N}, \quad (2.40)$$

де

v_i^q – пріоритет альтернативи A_i ($i = \overline{1, N}$), одержаний методом M_q , ($q = \overline{1, n}$),
 N – кількість альтернатив, n – кількість методів.

Внаслідок проведення агрегування результатів, отримані координати вектору пріоритетів S_A можуть набувати малих значень, що ускладнює їх інтерпретацію та порівняння. У зв'язку з цим доцільно здійснити процедуру нормалізації вектору S_A , аналогічну процедурі (2.34)-(2.35), з метою приведення їх до єдиного масштабу та забезпечення коректності подальшого аналізу.

Серед *переваг* цього підходу: зменшення суб'єктивності при виборі ваг методів; простота обчислень; збереження мультиплікативного ефекту, що важливо, якщо оцінки сильно відрізняються.

Серед *недоліків* цього підходу: допускається однакова значущість усіх методів, що може бути нереалістично в деяких прикладних задачах; не враховується специфіка чи надійність окремих методів в конкретній задачі.

Такий підхід рекомендовано застосовувати, якщо немає обґрунтованих підстав виділяти окремі методи за рівнем важливості, або для забезпечення нейтральної об'єднаної оцінки.

Вибір підходу до задання вагових коефіцієнтів залежить від мети дослідження, контексту задачі та наявних експертів. У випадку, якщо важливо врахувати думку експерта з мінімальною складністю, доцільно використовувати експертне оцінювання вагових коефіцієнтів. Якщо потрібна структурована система з оцінкою узгодженості, варто обрати підхід визначення вагових коефіцієнтів методів з використанням процедури парних порівняння методу аналізу ієрархій. Якщо ж ставиться завдання максимальної нейтральності без суб'єктивного

втручання, кращим є підхід з рівною важливістю всіх методів із застосуванням середнього геометричного.

2.6 Висновки до розділу 2

У другому розділі наведено теоретичні відомості щодо інформаційних ситуацій прийняття рішень, зокрема проаналізовано та систематизовано інформаційні ситуації прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації. Виконано загальну постановку задачі багатокритеріального прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації.

Показано, що задачі прийняття рішень в інформаційних ситуаціях ризику, невизначеності та нечіткої інформації з формальної точки зору є частинними випадками загальної задачі багатокритеріального прийняття рішень.

Розроблено концептуальну модель R-U-F можливих інформаційних ситуацій прийняття рішень, яка відображає взаємозв'язок між основними типами складних інформаційних ситуацій, що виникають під час багатокритеріального прийняття рішень: інформаційною ситуацією прийняття рішень в умовах ризику (Risk, R), інформаційною ситуацією прийняття рішень в умовах повної невизначеності (Uncertainty, U) та інформаційною ситуацією прийняття рішень в умовах нечіткої інформації (Fuzzy, F). Визначено ключові особливості цієї моделі серед яких: універсальність, гнучкість, інтегративність.

Розроблено модель процесу прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації, що відповідає запропонованій концептуальній R-U-F-моделі можливих інформаційних ситуацій прийняття рішень і передбачає можливість вибору кількох методів прийняття рішень як традиційних, так і модифікованих, комбінованих та гібридних методів для розв'язання поставленої задачі з подальшим агрегуванням одержаних результатів.

У розробленій моделі визначено її етапи, завдання, та кроки. Проведено аналіз характеристик класів традиційних, модифікованих, комбінованих та гібридних методів прийняття рішень, наведено їх переваги та недоліки.

Проаналізовано популярні методи розв'язання задачі багатокритеріального прийняття рішень (MCDM). Проведено порівняння двох підходів до багатокритеріального прийняття рішень: багатоцільового прийняття рішень (Multi-Objective Decision Making, MODM) і багатокритеріального аналізу альтернатив (Multi-Attribute Decision Making, MADM). Наведено опис популярних методів MADM та зроблено їх розподіл щодо можливості застосування в інформаційних ситуаціях в умовах визначеності, невизначеності, ризику та нечіткої інформації. Проведено порівняльний аналіз характеристик деяких популярних методів MADM, зокрема: АНР; ANP; TOPSIS; MOORA; методів прийняття рішень в умовах ризику; методів прийняття рішень в умовах повної невизначеності.

Розроблено методику застосування декількох методів прийняття рішень в межах однієї задачі з агрегуванням результатів за різними підходами до визначення вагових коефіцієнтів методів, зокрема: за допомогою експертного оцінювання; з використанням процедури парних порівняння методу аналізу ієрархій; з використанням середнього геометричного для випадку рівної важливості методів. Наведено основні етапи реалізації цієї методики, математичне обґрунтування та проаналізовано її переваги та недоліки.

Результати досліджень другого розділу опубліковані в роботі [42].

Список використаних джерел до розділу 2

1. Ус С.А. Моделі й методи прийняття рішень: навч. посіб. / С.А. Ус, Л.С. Коряшкіна; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». 2-ге вид. випр. Дніпро : НТУ «ДП», 2018. 300 с.
2. Ситник В. Ф. Системи підтримки прийняття рішень: Навч. посіб. К.: КНЕУ, 2009. 614 с.
3. Волошин О.Ф., Мащенко С.О. Моделі та методи прийняття рішень: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / О.Ф. Волошин, С.О. Мащенко. 3-є вид., перероб. К.: «Видавництво Людмила», 2018. 292 с.

4. Бідюк П. І., Коршевніук Л. О. Проектування комп'ютерних інформаційних систем підтримки прийняття рішень : навчальний посібник. Київ : ННК «ІПСА» НТУУ «КПІ», 2010. 340 с.
5. Бідюк О. П. Комп'ютерні системи підтримки прийняття рішень / О. П. Бідюк, О. П. Гожий, Л. О. Коршевніук. Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2012. 380 с.
6. Гнатієнко Г.М., Снитюк В.Є. Експертні технології прийняття рішень: Монографія. К.: ТОВ «Маклаут». 2008. 444 с.
7. Кігель В. Р. Методи і моделі підтримки прийняття рішень у ринковій економіці [Текст] : монографія / В. Р. Кігель. К. : ЦНЛ, 2003. 202 с.
8. Демиденко М. А. Системи підтримки прийняття рішень : навч. посіб. Нац. гірн. ун-т. Електрон. текст. дані. Д. : 2016. 104 с.
9. Олексюк О. С. Системи підтримки прийняття фінансових рішень на мікрорівні. Київ : Наукова думка, 1998. 508 с.
10. Нестеренко О. В., Савенков О. І., Фаловський О. О. Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень: Навч. посібн. / За ред. П.І. Бідюка. Київ: Національна академія управління, 2016. 188 с.
11. Gołębiewski, G. (2019). *Scientific Classification and Typology: Concepts and Practices*. European Journal of Science and Theology.
12. Losee, R.M. (2001). *A Discipline Independent Definition of Information*. Journal of the American Society for Information Science.
13. Jaccard, J., & Jacoby, J. (2020). *Theory Construction and Model-Building Skills: A Practical Guide for Social Scientists*. Guilford Press. 413 p.
14. Keeney, R.L., & Raiffa, H. (1993). *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*. Cambridge University Press.
15. Kabir, G., Sadiq, R., & Tesfamariam, S. (2014). A review of multi-criteria decision-making methods for infrastructure management. *Structure and Infrastructure Engineering*.
16. Saaty, T. L. (2008). Decision Making with the Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), P. 83–98.
17. Zavadskas, E.K., & Turskis, Z. (2011). Multiple criteria decision making (MCDM) methods in economics: An overview. *Technological and Economic Development of Economy*.

18. Mardani, A., Jusoh, A., & Zavadskas, E.K. (2015). Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications – Two decades review from 1994 to 2014. *Expert Systems with Applications*.
19. Kahraman, C., & Öztayşi, B. (2014). Fuzzy multi-criteria decision making: A literature review. *International Journal of Computational Intelligence Systems*.
20. Xu, Z., & Da, Q. (2003). An overview of methods for multiple attribute group decision making under uncertain environments. *Knowledge-Based Systems*.
21. Gomes, M. I., & Martins, N. C. (2022). *Mathematical Models for Decision Making with Multiple Perspectives: An Introduction*. Boca Raton, FL: CRC Press. 300 p.
22. Munier, N. (2021). *Mathematical Modelling of Decision Problems: Using the SIMUS Method for Complex Scenarios*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing. 196 p.
23. Aruldoss, M.; Lakshmi, M.T.; Venkatesan, V.P. A survey on multi criteria decision making methods and its applications. *Am. J. Inf. Syst.* 2013, 1. P. 31–43.
24. Velasquez, M.; Hester, P.T. An analysis of multi-criteria decision making methods. *Int. J. Oper.* 2013, 10. P. 56–66.
25. Habenicht, W.; Scheubrein, B.; Scheubrein, R. Multiple-criteria Decision Making. *Optim. Oper. Res.* 2002, 4. P. 257–279.
26. Bozorg-Haddad, Omid & Loaiciga, Hugo & Zolghadr-Asli, Babak. (2021). A Handbook on Multi-Attribute Decision-Making Methods. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119563501>.
27. ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books. URL: <https://www.sciencedirect.com> (дата звернення: 03.05.2025).
28. Kaplinski, O., Peldschus, F., Nazarko, J., Kaklauskas, A., & Baušys, R. (2019). MCDM, operational research and sustainable development in the trans-border Lithuanian–German–Polish cooperation. *Engineering Management in Production and Services*, 11. P. 7–18.
29. Pramanik, P.K.D.; Biswas, S.; Pal, S.; Marinković, D.; Choudhury, P. A Comparative Analysis of Multi-Criteria Decision-Making Methods for Resource Selection in Mobile Crowd Computing. *Symmetry* 2021, 13, 1713. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym13091713>.

30. Thomas L. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*; McGraw-Hill International Book Company, 1980, 287 p.
31. Hwang, C.L., Yoon K. *Methods for Multiple Attribute Decision Making*. In: *Multiple Attribute Decision Making. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1981. Vol 186. P. 58-191. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9_3.
32. Kolodner, J. L. (1993). Understanding creativity: A case-based approach. In *European Workshop on Case-Based Reasoning*. P. 1–8. Springer.
33. Ju-Long, D. (1982). Control problems of grey systems. *Systems and Control Letters*, 1(5). P. 288–294.
34. Saaty, T. L. (1996). *Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process*. RWS Publications.
35. Van Laarhoven, P. J., & Pedrycz, W. (1983). A fuzzy extension of Saaty's priority theory. *Fuzzy Sets and Systems*, 11(3). P. 229–241
36. Banayoun, R., Roy, B., & Sussman, N. (1966). *Manual de Reference du Programme Electre, Note de Synthese et Formation 25*. Direction Scientifique SEMA.
37. Brans, J.-P. (1982). *L'ingénierie de la Décision: L'élaboration D'instruments D'aide a la Décision*. Université Laval, Faculté des Sciences de L'administration.
38. Opricovic, S. (1998). *Multicriteria Optimization of Civil Engineering Systems*. Faculty of Civil Engineering.
39. Chen, C.-T. (2000). Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy Sets and Systems*, 114(1). P. 1–9.
40. Gabus, A., & Fontela, E. (1972). *World problems, an invitation to further thought within the framework of DEMATEL*. Battelle Geneva Research Center. P. 1–8.
41. Matarazzo, B. (1988). Preference ranking global frequencies in multicriterion analysis (PRAGMA). *European Journal of Operational Research*, 36(1). P. 36–49.
42. Maksymov, A., & Tryus, Yu. (2025). Information technology for solving the multicriteria decision-making problem using the modified Fuzzy TOPSIS method. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*, 30(1), pp. 91-106. ISSN 2306-4412 DOI: <https://doi.org/10.62660/bcstu/1.2025.91>.

РОЗДІЛ 3

ЗАДАЧА, МОДЕЛІ І МЕТОДИ УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ

3.1 Задача управління ризиками в процесах прийняття рішень

В контексті аналізу ризиків, невизначеність розглядається як первинний фактор, у той час як ризик є вторинним фактором. Існує прямий зв'язок між рівнем невизначеності та рівнем ризику: зі зростанням невизначеності зростає й ризик. Проте обидва ці фактори відіграють ключову роль у підприємницькій діяльності. Згідно з думкою дослідників [1], основна відмінність між цими явищами полягає у можливості їх вимірювання та оцінки: невизначеність вимірювати неможливо або вкрай складно, в той час як ризик можна оцінити. Більш важливою відмінністю між цими двома явищами є можливість впливу: ризиком, на відміну від невизначеності, яка не є об'єктивним явищем, можна, і потрібно управляти.

Управління ризиками включає в себе прогнозування перспектив розвитку діяльності підприємства, аналіз можливих відхилень від запланованих результатів і керування цими відхиленнями за допомогою вдосконалення бізнес-процесів та мінімізації негативних наслідків. Слід зауважити, що оскільки невизначеність є неодмінною частиною реальності, повне уникнення ризику неможливе. Отже, ризик завжди присутній, і прийняття рішень повинно базуватися на стратегії управління ризиками.

Задача управління ризиками – це задача прийняття рішень, спрямована на вибір стратегії з множини допустимих, яка забезпечує мінімізацію негативних наслідків ризиків та максимізацію вигод за визначеними критеріями. Формально задача полягає у визначенні найкращого рішення з урахуванням кількісної оцінки ризику та обмежень системи [2].

Відповідно до наведеного визначення задачі управління ризиками можна зробити висновок, що цю задачу доцільно розглядати як задачу багатокритеріального прийняття рішень.

У будь-якій діяльності, що супроводжується невизначеністю, ризик є невід'ємною складовою процесу прийняття рішень. Саме тому управління

ризиками виступає фундаментальним етапом у підході до вирішення багатокритеріальних задач. Незалежно від того, наскільки ефективно ОПР мінімізує ризики, повністю усунути їх не вдається – вони завжди зберігаються як певний невід’ємний елемент середовища прийняття рішень.

Проте ключовим моментом є те, що попереднє управління ризиками дозволяє знизити їхній рівень до прийнятних меж, що суттєво полегшує подальше прийняття рішень. Ця логіка обумовлює послідовність: перш ніж застосовувати методи багатокритеріального прийняття рішень, необхідно провести аналіз ризиків і здійснити заходи щодо їх зниження. Це дозволяє зменшити їх негативний вплив та забезпечує більш стійкі результати у подальшій роботі.

Найбільш поширеною і дослідженою задачею управління ризиками є задача управління ризиками проєктів. Тому більш детально розглянемо цю задачу.

Поняття ризику проєкту має різні визначення, зокрема в стандарті ISO 31000: 2018 [3] зазначено, що «ризик – це вплив невизначеності на досягнення цілей». При цьому вважають, що вплив – це відхилення від очікуваного – позитивне чи негативне, а цілі можуть мати різні аспекти і можуть застосовуватися на різних рівнях (таких як стратегічний, загальноорганізаційний, проєктний, продуктовий і процесний) [3]. Ризик часто характеризується впливом на потенційні події та наслідки або їх поєднання. Також ризик виражається в термінах комбінації наслідків події (включаючи зміни в обставинах) і пов’язаної з цим ймовірності настання події. Невизначеність – це стан, навіть частковий, дефіциту інформації, пов’язаної з подією, її наслідком або ймовірністю, розумінням або знанням про неї [3]. Одним з популярних інструментів управління ризиками у проєктах є метод матриці ризиків (англ. Consequence/Likelihood Matrix, Risk Matrix) [4], який передбачає створення таблиці, де зазначаються найважливіші граничні значення ймовірностей виникнення ризиків та граничні значення їх впливу на проєкт. У методі матриці ризиків оцінюється рівень ризику на перетині рядків (ймовірності виникнення ризиків у проєкті) та стовпців (вплив ризиків на проєкт). Це простий, але ефективний механізм, який допомагає збільшити видимість ризиків і сприяє управлінню прийняттям рішень. Разом з цим, він має певні недоліки, серед яких

основним є проблема некоректної класифікації ризиків проєкту, що може негативно вплинути на прийняття рішення щодо заходів їх усунення та запобігання. Тому подальше дослідження і розробка ефективних методів управління ризиками проєктів та створення сучасних технологій їх реалізації є актуальною науковою і практичною проблемою.

Дослідження з питань *управління проєктами* представлені в працях таких вітчизняних науковців, як Бушуєв С. Д. [5], Бушуєва Н. С. [6], Данченко О. Б. [7], Тесля Ю. М. [8], Морозов В. В. [9], Зачко О. Б. [10], Прокопенко Т. О. [11], Бедрій Д. С. [12], Колеснікова К. В. [13].

Питанням розроблення та впровадження методів і технологій управління ризиками в практику діяльності організацій і підприємств присвячені праці таких вітчизняних та зарубіжних дослідників як Геєць В. М. [14], Шарапов О. Д. [15], Вітлінський В. В. [16], Данченко О. Б. [17], Бедрій Д. С. [18], Чумаченко І. В. [19], Кононенко І. В. [20], Колеснікова К. В. [21], Тригуба А. М. [22], Зачко О. Б. [23], Peter Bernstein [24], Nassim Nicholas Taleb [25], Gerd Gigerenzer [26], Robert S. Kaplan [27], Douglas W. Hubbard [28], Irving H. LaValle та Peter C. Fishburn [29, 30], Paul Slovic [31].

Також можна виділити публікації останніх років, які присвячені проблемам побудови системного управління ризиками [32], [33]. У роботі [34] запропоновано підхід до створення матриць ризику, який інтегрує ставлення до ризику на основі теорії корисності. В роботі [35] запропоновано структуру аналізу матриці ризику для оцінки ризику та встановлення пріоритетів на основі потенційного впливу ризику (PRI). В роботі [36] запропоновано використовувати комбінований нечіткий підхід за методом аналізу ієрархій.

В статті [18] представлений комплексний огляд, який підтверджує висновки раніше проведених досліджень [4] щодо обмежень у використанні методу матриці ризиків. У даній роботі відзначається значущість проведення кількісної оцінки ризиків, коли зацікавлені сторони можуть узгоджувати оцінювання ризиків. Розглянуто важливість усунення методологічної невизначеності і двозначностей, що можуть виникати при використанні методу матриць ризиків. Також, автори статті зазначають, що колір комірок матриці ризиків суттєво впливає на сприйняття

ризик, але впровадження певних принципів, таких як логарифмічне масштабування та об'єктивні якісні оцінки, підкріплені кількісними даними, можуть покращити ефективність методу матриці ризиків. Додатково, розглянуто проблеми, що пов'язані з агрегуванням ризиків, категоризацією наслідків та можливістю створення стандартизованих корпоративних матриць ризиків.

3.2 Аналіз засобів управління ризиками

За даними досліджень, проведених Федерацією європейських асоціацій з ризик-менеджменту, зарубіжна практика свідчить про те, що значна частина компаній активно впроваджує системи управління ризиками. Згідно з проведеним опитуванням, 79% опитаних підприємств здійснюють управління ризиками, а з них 44% виділяють управління ризиками як окрему підсистему менеджменту підприємства [1]. Ці дані вказують на тенденцію до поширення інструментів ризик-менеджменту та на усвідомлення важливості систематичного підходу до контролю та мінімізації ризиків у бізнесі [1]. Впровадження системи управління ризиками на підприємстві передусім ґрунтується на дотриманні національних та міжнародних стандартів. У випадку можливого виникнення негативних сценаріїв, ці стандарти визначають алгоритми дій для зменшення їх впливу на діяльність підприємства. На рисунку 3.1 зображено діаграму взаємозв'язку між стандартами, методологіями та методами для управління ризиками. При цьому застосовано логічне співставлення, оскільки стандарти – це ширші рамки або правила, які можуть містити різні методології, а методології включають конкретні методи для вирішення задач.



Рисунок 3.1 – Діаграма взаємозв'язку між стандартами, методологіями та методами для управління ризиками [розроблено автором]

Стандарт – це документ, що встановлює вимоги, настанови або характеристики, які повинні бути дотримані у певній сфері чи галузі. Він визначає, що потрібно зробити, щоб відповідати певному рівню якості, безпеки або ефективності [38]. Приклади стандартів наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Міжнародні стандарти управління та керівництва в галузі управління ризиками, інформаційної безпеки та проєктного менеджменту [на основі робіт [3, 38-41]]

№	Стандарт	Основні характеристики стандарту	Розробник
1.	Стандарт ISO 31000 та ISO 31010	Визначають загальні принципи та настанови для ефективного управління ризиками в будь-якій організації, надаючи засоби для ідентифікації, оцінки, обробки та моніторингу ризиків. Стандарт дає огляд основних методів оцінки ризиків [3, 38].	МЕК (IEC)
2.	Стандарт ISO 27001	Встановлює вимоги до систем управління інформаційною безпекою, зокрема, управління ризиками, контроль доступу, неперервність діяльності та постійну оцінку та вдосконалення [39].	МЕК (IEC)
3.	Стандарт NIST 800-53	Стандарт для управління безпекою та конфіденційністю інформаційних систем через набір контрольних заходів і управління ризиками [40].	Національний інститут стандартів і технологій США (NIST)
4.	Стандарт PMBOK	Стандартизований набір кращих практик і процесів для управління проєктами, що охоплює ініціацію, планування, виконання, моніторинг і завершення проєктів, з акцентом на управління ресурсами, ризиками та досягнення проєктних цілей [41].	(Project Management Institute, PMI)

Наразі існує понад 23000 стандартів, розроблених Міжнародною організацією зі стандартизації, що охоплюють широкий спектр тем – від технологій до управління якістю, охорони здоров'я та безпеки. ISO постійно займається розробкою нових стандартів та оновленням наявних, щоб відповідати сучасним технологічним змінам і вимогам ринку.

Стандарт для управління ризиками – це нормативний офіційний документ, що затверджуються організаціями, такими як ISO, ANSI, IEC, NIST тощо, який встановлює загальні принципи, рамки, процеси та рекомендації щодо ідентифікації, оцінки, моніторингу, контролю та мінімізації ризиків [3, 38-41].

Методологія управління ризиками – це систематизований підхід, який включає набір принципів, методів і процесів, призначених для управління ризиками в організації або проєкті [38-41].

Методи управління ризиками – це конкретні інструменти та підходи, які застосовуються для ідентифікації, аналізу, оцінки, мінімізації або моніторингу ризиків [38-41].

Оскільки ISO 31000 зазвичай використовується в комбінації з ISO 27001, тому окремо для порівняння даний стандарт не розглядається.

Переваги стандартів ISO 31000, NIST 800-53 та PMBOK можна відобразити за допомогою діаграми, представленої на рисунку 3.2.

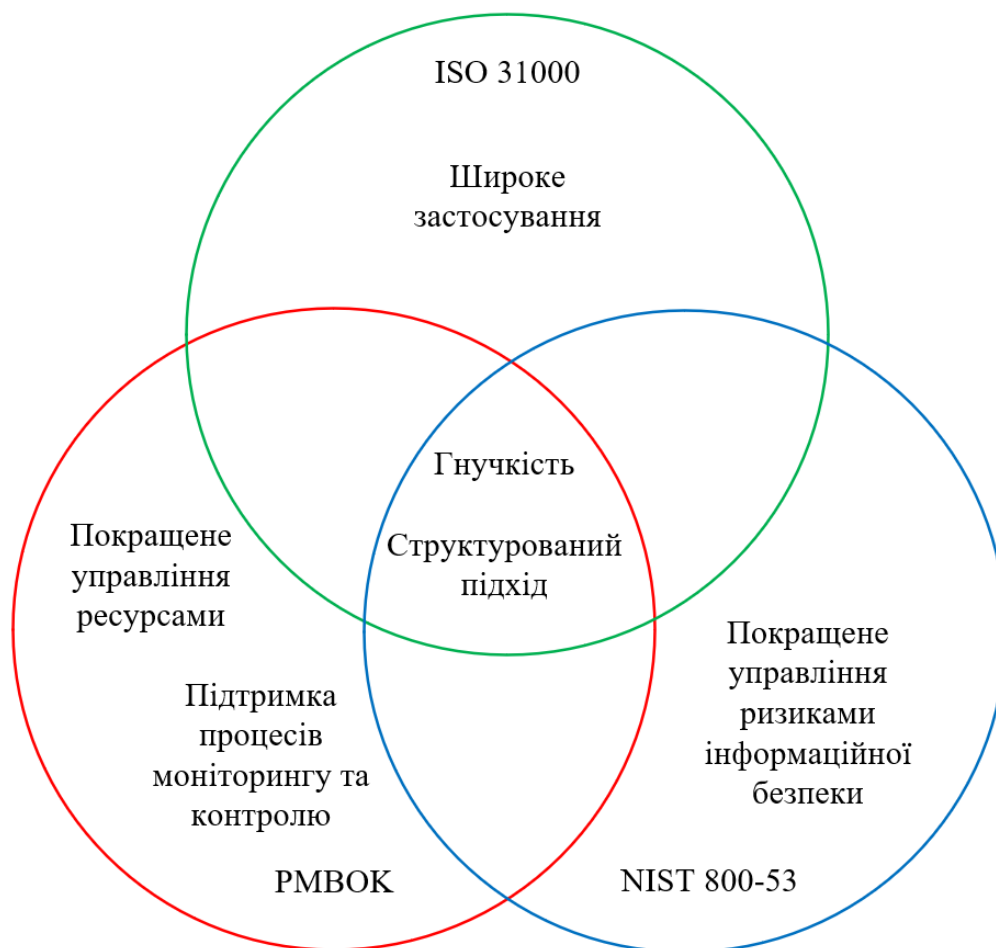


Рисунок 3.2 – Переваги стандартів ISO 31000, NIST 800-53 та PMBOK
[розроблено автором]

Недоліки стандартів ISO 31000, NIST 800-53 та PMBOK можна відобразити за допомогою діаграми, представленої на рисунку 3.3.



Рисунок 3.3 – Недоліки стандартів ISO 31000, NIST 800-53 та PMBOK
[розроблено автором]

В результаті аналізу було встановлено, що для управління ризиками в ІТ-проектах найбільше підходить стандарт ISO 31000. Даний стандарт в комбінації зі стандартом ISO 31010 є найбільш адаптивним, оскільки на початкових етапах його впровадження він легше інтегрується в існуючі системи. Цей стандарт може слугувати основою для подальшого впровадження інших стандартів, які будуть доповнювати один одного завдяки наявності різногалузевих норм у рамках ISO.

В науковому дослідженні для управління ризиками в СППР «Decisioner» обрано ISO 31000, оскільки ІТ-компанії можуть співпрацювати з різними галузями. Наприклад, розробка програм може бути пов'язана з агросектором, з фінансовими установами, освітніми установами, тощо. Тому варто враховувати особливості конкретної галузі, для якої створюється програмне забезпечення.

Оскільки використання ISO 31010 забезпечує відповідність міжнародним вимогам та підвищує прозорість і ефективність управлінських процесів, для аналізу ризиків доцільно обирати методи, що визначені цим стандартом. Стандарт ISO 31010 охоплює деякі методи оцінки ризику, які описано за наступною схемою: 1) загальний огляд; 2) застосування; 3) вхідні дані; 4) процес; 5) вихідні дані; 6) переваги та обмеження. В ДСТУ 31010:2013 [42] серед методів управління ризиками виділені багатокритеріальні методи прийняття рішень (Додаток Г).

Оскільки планування та реалізація проєкту відбувається в умовах невизначеності, це породжує зміну внутрішнього та зовнішнього середовища. У форматі проєкту невизначеність – це відсутність достовірної та повної інформації щодо умов реалізації проєкту. Будь-який проєкт містить в собі виконання якої-небудь нової діяльності в нових умовах, з використанням нових ресурсів і для створення нового результату. Більшість складних проєктів усе більш невизначені вже з перших стадій своєї розробки. Новизна або інноваційність проєкту приводить до появи ризиків у широкому розумінні. Ризики можна визначити як невизначеності, пов'язані з виникненням у ході проєкту ситуацій, наслідком яких є вплив на тривалість, витрати та якість проєкту [41].

Під управлінням ризиками розуміють процес реагування на події та зміни ризиків у процесі виконання проєкту. Основна стратегія управління ризиками – це їх мінімізація. Управління ризиками поєднує у собі планування ризиків, реалізацію дій по реагуванню, контроль, роботу з новими ризиками, або ризиками, що залишилися [41].

Планування управління ризиками – процес в якому робиться вибір підходу до планування і управління ризиками для конкретного проєкту. Даний процес складається з таких рішень: рішення по обмеженнях реагування на ризики, рішення по організації і кадровому забезпеченню процедур управління ризиками проєкту, вибору джерел даних і часових інтервалів для ідентифікації ризиків, їх фінансовому забезпеченню [41].

На рисунку 3.4 зображено схему процесу управління ризиками. Ця схема є циклічним процесом: після моніторингу та контролю можливе повернення до попередніх етапів у разі виявлення нових ризиків або зміни умов проєкту.

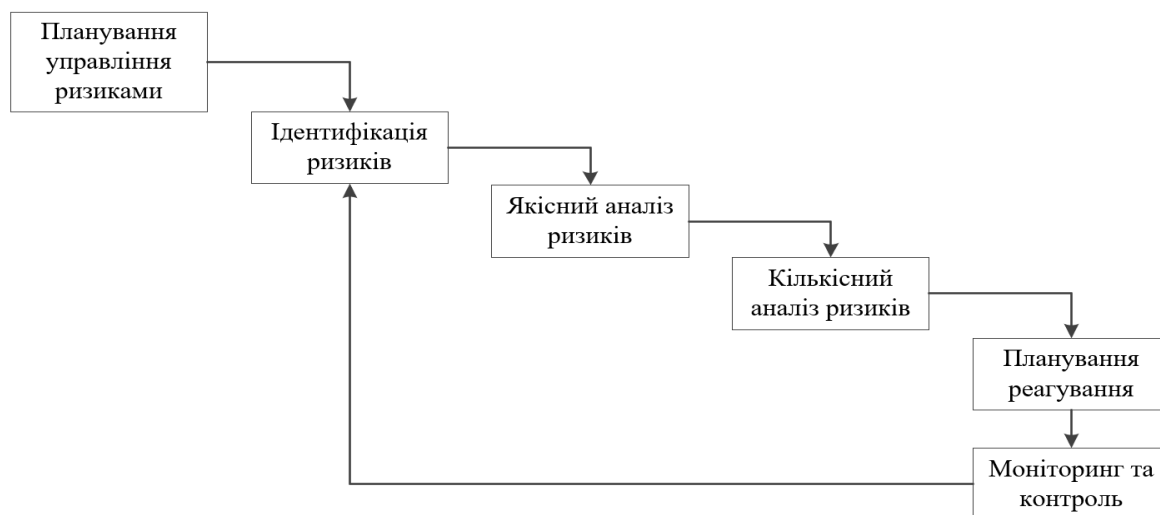


Рисунок 3.4 – Схема процесу управління ризиками [розроблено на основі [41]]

У дослідженні проаналізовано приклади деяких програмних засобів управління ризиками, зокрема: Onspring [43], Checkbox [44], Qualityze Suite [45], Wrike [46], AuditBoard [47]. Результати проведеного аналізу наведено в додатку Г «Огляд методів і програмних засобів управління ризиками».

Розглянуті програмні засоби управління ризиками мають широкий набір функцій, що охоплюють основні аспекти управління ризиками, зокрема аудит ризиків, оцінювання ризиків, складання звітності, налаштування робочих процесів, управління інцидентами, інтеграцію з іншими системами, моніторинг у реальному часі, створення інформаційних панелей та підтримку політик безпеки.

Більшість проаналізованих програмних засобів реалізують класичний метод матриці ризиків, який передбачає оцінку ризику шляхом співставлення ймовірності настання ризику та рівня його впливу. У процесі аналізу цього методу було виявлено низку недоліків:

1. Класичний метод матриці ризиків передбачає лише два критерії, за якими оцінюється їх важливість і вплив на проєкт;

2. Ризики, які мають однакові кількісні значення величини R , можуть належати до різних рівнів ризиків, що, з математичної точки зору, є некоректним;

3. Класичний метод матриці ризиків використовує, як правило, три рівні ризиків «низький», «середній» і «високий». Але для більш об'єктивного оцінювання рівнів ризику іноді доцільно використовувати іншу шкалу оцінювання, наприклад досить популярну п'ятибальну шкалу: «дуже низький», «низький»,

«середній», «високий», «дуже високий». Тоді рівноцінно «зафарбувати» область матриці ризиків при різних кроках розбиття сторін квадрата області ризиків досить складно, а іноді просто неможливо;

4. При визначенні до якого рівня належать ризики, особливо коли їх багато, часто трапляються ситуації, що існують ризики, що мають однаковий рівень, наприклад «високий», і керівнику проєкту важко визначити якому з них надати перевагу для першочергового усунення.

3.3 Постановка задачі визначення рівнів ризиків

При створенні інформаційної технології з управління ризиками проєктів було проаналізовано стандарт «IEC/ISO 31010 Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику». Стандарт належить до групи стандартів з ризик-менеджменту, до якої входять такі стандарти: ISO 31000: 2018 Risk management – Guidelines [3]; IEC 31010:2019 Risk management – Risk assessment techniques [38].

У стандарті [38] виділено різні категорії методів для застосування в галузі управління ризиками та вказано перелік найбільш популярних методів, що до них належать. Серед них виділимо такі:

- *Методи вибору між варіантами (Techniques for selecting between options):* Аналіз зисків і витрат (Cost/benefit analysis, CBA); Дерево ухвалення рішень (Decision tree analysis); Теорія ігор (Game theory); Багатокритеріальний аналіз (Multi-criteria analysis, MCA), зокрема АНР;
- *Методи запису та звітності (Techniques for recording and reporting):* Реєстри ризиків (Risk registers); Матриця наслідків / ймовірності або матриця ризиків / теплова карта (Consequence/Likelihood Matrix або Risk Matrix / Heat Map); Аналіз S-кривих (S-curves).

У дослідженні реалізовано модифікований метод матриці ризиків для оцінювання ризиків проєкту за кількома критеріями у комбінації з методом аналізу ієрархій (MAI) для визначення пріоритетів ризиків з метою запобігання та усунення, в першу чергу, тих з них, що мають найвищий пріоритет.

Обрання МАІ у поєднанні з методом матриці ризиків у рамках управління ризиками, згідно зі стандартом ISO 31010, обумовлене кількома факторами, які включають наукову обґрунтованість, ефективність і широту застосування цих методів:

1. *Належна наукова обґрунтованість.* МАІ є відомим методом прийняття рішень, який базується на математичних принципах та теоріях прийняття рішень. Він дозволяє систематизувати та оцінювати альтернативи за кількома критеріями, враховуючи їх взаємозв'язок та пріоритетність. Цей метод надає можливість науково обґрунтовано визначати пріоритетність ризиків та приймати обґрунтовані рішення щодо управління ними.

2. *Ефективність методів.* Використання методу МАІ у поєднанні з методом матриці ризиків дозволяє ефективно оцінювати ризики. Метод матриці ризиків допомагає ідентифікувати та класифікувати ризики з точки зору їх ймовірності та впливу, в той час як МАІ допомагає визначити їхню вагомість та пріоритетність у контексті ієрархічної структури критеріїв.

3. *Універсальність та застосовність.* Обидва методи, МАІ та метод матриці ризиків, можуть бути застосовані у широкому спектрі галузей та сфер управління. Вони можуть бути використані як у промисловості та IT-індустрії, так і в інших галузях, де важливо ефективно управляти ризиками. Універсальність цих методів дозволяє використовувати їх для різних типів організацій та проєктів, що робить їх привабливими для впровадження у рамках стандартів ISO 31010.

4. *Системний підхід.* Обидва методи дозволяють розглядати ризики у контексті системного підходу, що важливо для повного та комплексного розуміння потенційних загроз та можливостей їх усунення. Метод аналізу ієрархій дозволяє розглядати ризики на різних рівнях системи та їх взаємозв'язок, в той час як метод матриці ризиків допомагає у визначенні конкретних параметрів ризику для кожного виявленого сценарію розвитку подій.

5. *Врахування багатокритеріальності.* МАІ дозволяє враховувати не тільки один критерій прийняття рішень, а кілька критеріїв, що є характерною рисою сучасного управління ризиками. Успішне управління ризиками часто вимагає

оцінки не лише фінансових аспектів, а й соціальних, екологічних, технічних тощо. Використання методу МАІ дозволяє систематизувати ці критерії та визначити їхню важливість для прийняття обґрунтованих рішень.

6. *Можливість аналізу та управління ризиками у реальному часі.* Обидва методи дозволяють проводити аналіз та оцінку ризиків у реальному часі. Це особливо важливо в динамічному середовищі, де ризики можуть змінюватися швидко. Використання МАІ у поєднанні з методом матриці ризиків дозволяє швидко адаптуватися до змін у внутрішньому та зовнішньому середовищі організації та ефективно реагувати на нові загрози.

7. *Можливість порівняння альтернатив (ризиків).* МАІ дозволяє порівнювати альтернативні стратегії управління ризиками та визначати ефективні шляхи щодо їх реалізації. Це особливо корисно в управлінні ризиками, де існує кілька можливих шляхів мінімізації чи управління ризиками. Метод аналізу ієрархій допомагає зробити об'єктивний вибір серед цих альтернатив, враховуючи їхні переваги та недоліки.

8. *Підвищення довіри стейкхолдерів.* Використання системного та науково обґрунтованого підходу до управління ризиками, яким є МАІ у поєднанні з методом матриці ризиків, сприяє підвищенню довіри стейкхолдерів до процесу управління ризиками. Це може бути важливим фактором для організацій, які залежать від підтримки та довіри своїх клієнтів, партнерів та інших зацікавлених сторін.

Разом з тим, метод матриці ризиків у класичному варіанті має певні суттєві обмеження і недоліки. Розглянемо деякі з них.

1. У традиційному методі матриці ризиків прийнято визначати оцінку ризику (R) як добуток ймовірності виникнення ризику (LI) на вплив ризику на проєкт (CO):

$$R = LI \cdot CO, \quad (3.1)$$

де $LI \in (0; 1]$, $CO \in (0; 1]$. Тоді, добутку значень ймовірності виникнення ризику та вплив відповідного ризику R відповідає точка з координати $(LI; CO)$, що належить одній з клітинок типової матриці ризиків (рис. 3.5 а).

Загальний підхід полягає у тому, щоб оцінити ймовірність та наслідки кожного ризику, а потім призначити їм певний класифікаційний рівень, що відповідає одній з клітинок матриці. Чим вище оцінка ризику (R), тим вищий рівень ризику. При виборі ризиків для управління, керівнику проекту переважно рекомендується застосовувати стратегію, яка передбачає надання переваги ризикам з найвищою оцінкою, розташованим у верхній правій частині матриці ризиків (у червоних клітинках). Цей підхід базується на припущенні, що ризик з вищою оцінкою є більш значущим і вимагає негайного управління. Такий підхід дозволяє керівництву спрямовувати ресурси та зусилля на управління найважливішими та найбільш суттєвими ризиками для забезпечення стабільності та успішності діяльності.

Нехай є ризик з ймовірністю $LI = 0.05$ і впливом $CO = 0.80$, який потрапляє до ризиків середнього рівня (жовтий квадрат) з $R = 0.04$. Але також може існувати ризик з $LI = 0.2$ та $CO = 0.2$, який класифікується як ризик низького рівня (зелений квадрат), проте його значення ризику також дорівнює $R = 0.04$. Ризик з $LI = 0.63$ та $CO = 0.643$, у якого $R = 0.405$, має середній рівень (жовтий квадрат) але ризик з $LI = 0.9$ та $CO = 0.45$ має високий рівень (червоний квадрат) при тому ж самому значенні ризику $R = 0.405$ (рис. 3.5 б).

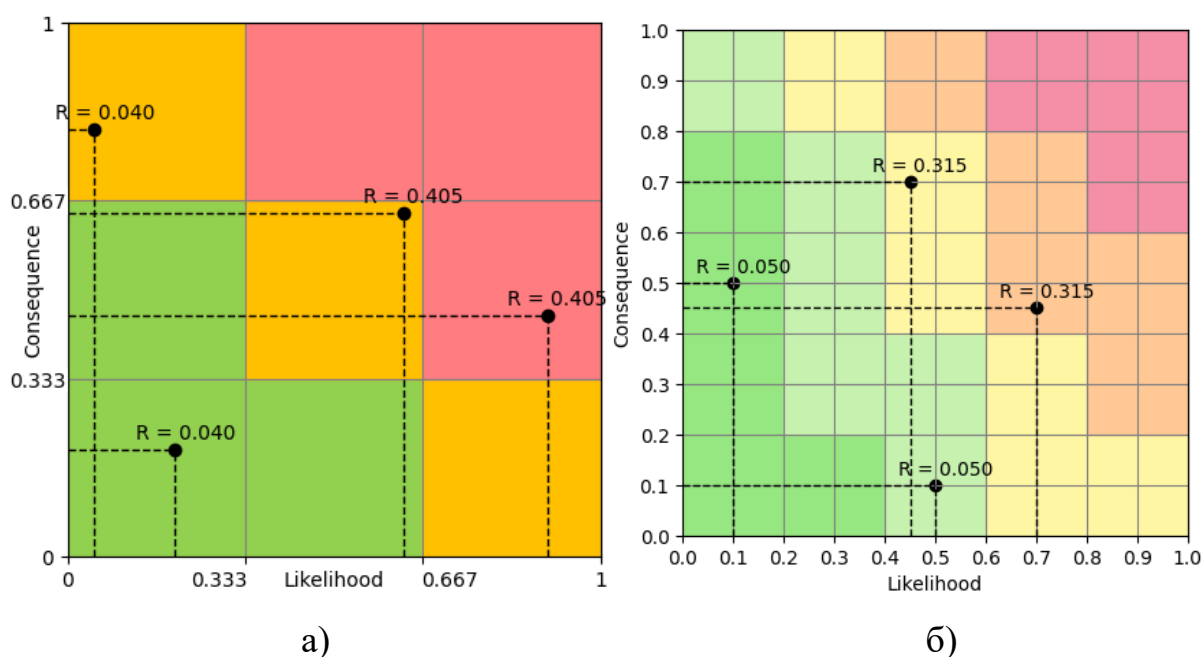


Рисунок 3.5 – Приклад матриць ризиків для трьох та п'яти рівнів ризиків
[розроблено автором]

Отже, ризики, які мають однакові кількісні значення величини R , можуть належати до різних рівнів ризиків, що, з математичної точки зору, є некоректним.

2. Класичний метод матриці ризиків передбачає лише два критерії, за якими оцінюється їх важливість і вплив на проєкт. Разом з тим, при реалізації реальних проєктів можуть виникнути ситуації, коли ризики проєкту характеризуються більшою кількістю як кількісних, так і якісних ознак для прийняття більш об'єктивних рішень щодо їх запобігання і усунення. Тоді геометрична інтерпретація результатів аналізу ризиків у вигляді матриці при трьох і більше критеріях ускладнюється. Що робить традиційний підхід неефективним.

3. Класичний метод матриці ризиків використовує, як правило, три рівні ризиків «низький», «середній» і «високий». Але для більш об'єктивного оцінювання рівнів ризику іноді доцільно використовувати іншу шкалу оцінювання, наприклад досить популярну п'ятибальну шкалу: «дуже низький», «низький», «середній», «високий», «дуже високий». Тоді рівноцінно «зафарбувати» область матриці ризиків при різних кроках розбиття сторін квадрата області ризиків досить складно, а іноді просто неможливо. Тому ризики, які мають однакове значення величини R можуть потрапити до різних «областей ризику» (рис. 3.5). Про що було зазначено у першій проблемі.

4. При визначенні до якого рівня належать ризики, особливо коли їх багато, часто трапляються ситуації, що існують ризики, що мають однаковий рівень, наприклад «високий», і керівнику проєкту важко визначити якому з них надати перевагу для першочергового усунення. Тому виникає проблема ранжування ризиків у межах як одного рівня ризику, так і всього проєкту, але метод матриці ризиків такої можливості не передбачає.

Враховуючи результати проведеного аналізу переваг і недоліків методу матриці ризиків, була поставлена задача запропонувати модифікований метод аналізу ризиків проєктів, який би не мав зазначених вище недоліків, а також розробити інформаційну технологію, що реалізовує цей метод.

3.4 Модель управління ризиками в проєктах

Створення інформаційної технології управління ризиками в проєктах передбачає: побудову моделі управління ризиками проєкту (Project Risk Management Model (PRMM)), розробку методу визначення рівнів ризиків проєкту та їх пріоритетів, побудову алгоритму, що реалізує цей метод, створення веб-ресурсу, що забезпечує автоматизацію процесу класифікації ризиків у режимі онлайн і визначення пріоритетів ризиків та їх рангів.

В дослідженні запропонована модель управління ризиками проєкту (Project Risk Management Model (PRMM)), що має такий вигляд:

$$PRMM = \langle A, C, K, R, F, M, WR, RPE \rangle, \quad (3.2)$$

де:

- $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ – множина ризиків проєкту;
- $C = \{C_1, C_2, \dots, C_s\}$ – множина рівнів ризику;
- $K = \{K_1, K_2, \dots, K_m\}$ – множина критеріїв оцінювання ризиків;
- $R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ – множина значень ризиків проєкту, що обраховуються у відповідності до наявних критеріїв і експертних оцінок для кожного ризику, заданих у таблиці 3.2, за формулою (3.3):

$$R_i = k_{i1} \cdot k_{i2} \cdot \dots \cdot k_{im}, \quad (3.3)$$

де $k_{ij} \in (0; 1], i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$.

Таблиця 3.2 – Матриця з експертними оцінками ризиків проєкту за заданими критеріями [розроблено автором]

Ризики	K_1	K_2	...	K_m	R	CA
A_1	k_{11}	k_{12}	...	k_{1m}	R_1	CA_1
A_2	k_{21}	k_{22}	...	k_{2m}	R_2	CA_2
...
A_n	k_{n1}	k_{n2}	...	k_{nm}	R_n	CA_n

Зауважимо, що при необхідності критеріям K_j з множини K можна задати вагу $v_j \in (0; 1]$, яка визначає важливість відповідного критерію K_j для управління

ризиками проєкту ($j = \overline{1, m}$). За замовченням всі критерії є рівноважливими, тобто $v_j = 1$ для всіх $j = \overline{1, m}$.

Нехай F – функціональна залежність, яка визначає відповідність між елементами A_i множини ризиків проєкту A і елементами C_j з множини рівнів ризиків C , що задається співвідношеннями:

$$A \xrightarrow{F} C, \quad (3.4)$$

$$F(A_i) = CA_i = \begin{cases} C_1, & \text{якщо } R_i \in (0; r_1], \\ C_j, & \text{якщо } R_i \in (r_{j-1}; r_j], j = \overline{2, s-1}, \\ C_s, & \text{якщо } R_i \in (r_{s-1}; 1], \end{cases} \quad (3.5)$$

де CA_i – рівень ризику A_i , $i = \overline{1, n}$; r_j – верхнє граничне значення для кожного рівня ризику C_j ($j = \overline{1, s-1}$), яке визначається експертами, або обчислюються автоматично так, щоб розподіл кількості значень виду

$$k = k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_m, \quad (3.6)$$

де $k_l \in (0; 1]$, $l = \overline{1, m}$, був рівним для всіх інтервалів:

$$(0; r_1], (r_1; r_2], \dots, (r_{j-1}; r_j], \dots, (r_{s-1}; 1]. \quad (3.7)$$

Зауважимо, що величини r_j , $j = \overline{1, s-1}$, що задовольняють цю умову, можна знайти експериментальним шляхом із заданою точністю. Для цього, наприклад, можна організувати перебір всіх значень k виду (3.6), коли всі k_l ($l = \overline{1, m}$) пробігають проміжок $(0; 1]$ із заданим кроком $0 < d \ll 1$, і знайти величини:

- SM – кількість згенерованих наборів виду $(k_1; k_2; \dots; k_m)$ у m -вимірному одиничному кубі;
- S_1 – кількість значень k виду (3.6), що задовольняють умову $0 < k \leq r_1$,
- S_j – кількість значень k виду (3.6), що задовольняють умову $r_{j-1} < k \leq r_j$, $j = \overline{2, s-1}$,
- S_s – кількість значень k виду (3.6), що задовольняють умову $r_{s-1} < k \leq 1$, при цьому параметри r_j , $j = \overline{1, s-1}$, підбираються так, щоб виконувалась умова:

$$S_1 \approx S_2 \approx \dots \approx S_j \approx \dots \approx S_s \approx [S_0]$$

із заданою точністю $0 < h \ll 1$, наприклад, коли

$$|[S_0] - S_j| < 1/h, j = \overline{1, s},$$

де $S_0 = SM/s$, $[S_0]$ – це ціла частина S_0 . Оскільки при малих значеннях d величини $S_0, S_1, S_2, \dots, S_s$ є досить великими числами, то для зручності ці величини доцільно перевести у відсотки: $PS_j = (S_j/S) \cdot 100\%$, $j = \overline{0, s}$. Тоді результатам цієї процедури можна дати геометричну інтерпретацію, наприклад так, як показано на рис. 3.6.

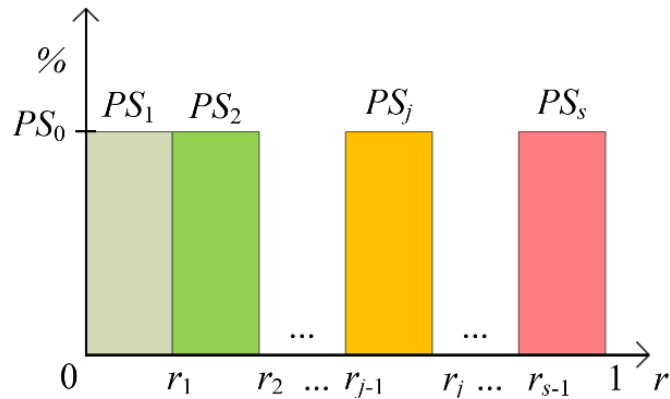


Рисунок 3.6 – Візуалізація рівномірного розподілу кількості значень k виду (3.6) в множині інтервалів виду (3.7) [розроблено автором]

Для кожного значення ризику R_i , $i = \overline{1, n}$, доцільно обчислити відносну відстань до найближчої нижньої межі r_j , $j = \overline{1, s-1}$, використовуючи формулу:

$$DLB_i = \frac{R_i - r_j}{r_{j+1} - r_j} \cdot \frac{100}{S_i}.$$

Використання цієї процедури дозволяє отримати уявлення про розподіл ризиків A_i , $i = \overline{1, n}$, та їх відносну позицію в межах кожного з рівнів ризику C_k , $k = \overline{1, s}$ (рис. 3.7). При цьому координати точки A_i дорівнюють $(R_i; DLB_i)$, $i = \overline{1, n}$.

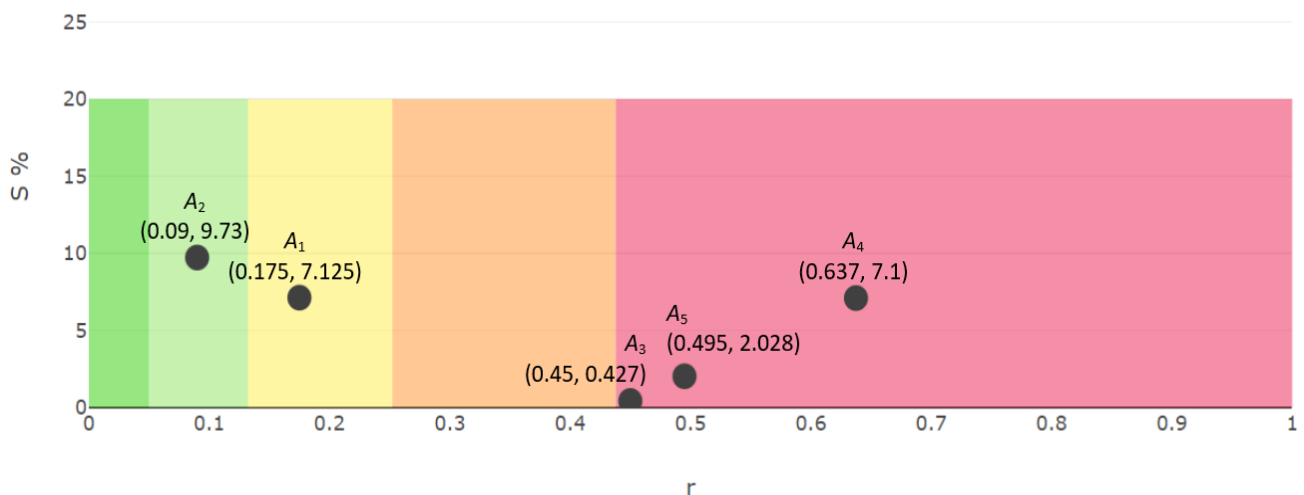


Рисунок 3.7 – Приклад розподілу ризиків та їх відносна позиція в межах кожного з рівнів ризику C_k , $k = \overline{1, 5}$ [розроблено автором]

Визначимо решту складових моделі (3.2).

$M = \{M_1, M_2, \dots, M_p\}$ – множина методів прийняття рішень для управління ризиками проєкту. У дослідженні $M = \{M_1, M_2, M_3\}$, де:

– M_1 – один з відомих методів експертного оцінювання, наприклад, у відповідності до ISO 31010 виділяють категорію методів «Techniques for eliciting views from stakeholders and experts» [38], до якої входять такі методи експертного оцінювання: мозковий штурм (англ. Brainstorming), метод Дельфі (англ. Delphi technique), номінальна групова техніка (англ. Nominal group technique), структуровані або напівструктуровані інтерв'ю (англ. Structured or semi-structured interviews), опитування (англ. Surveys) [38];

– M_2 – модифікований метод матриці ризиків;

– M_3 – метод аналізу ієрархій.

$WR = \langle W, RR \rangle$, де $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)$ – вектор пріоритетів ризиків проєкту A_i , $i = \overline{1, n}$, що одержується за допомогою MAI, $RR = (RR_1, RR_2, \dots, RR_n)$ – вектор відповідних рангів ризиків проєкту.

$RPE = \langle RP, RE \rangle$ – множина заходів щодо запобігання та усунення ризиків проєкту, де:

– RP (*risk prevention*) – множина заходів щодо запобігань ризиків;

– RE (*risk elimination*) – множина заходів щодо усунення ризиків.

Для прикладу, розглянемо частинний варіант моделі (2.2), що є узагальненням моделі, яка використовується у класичному методі матриці ризиків (див., наприклад, [4]):

$$PRMM_{32} = \langle A, C, K, R, F, M \rangle, \quad (3.8)$$

де

– $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ – множина ризиків проєкту;

– $C = \{C_1, C_2, C_3\}$ – множина рівнів ризиків, C_1 – низький рівень; C_2 – середній рівень; C_3 – високий рівень;

– $K = \{K_1, K_2\}$ – множина критерії оцінювання ризиків, де K_1 – ймовірність виникнення ризику на проєкті, K_2 – вплив ризику на проєкт;

– $R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ – множина значень ризиків проєкту, що обраховуються у відповідності до наявних критеріїв і експертних оцінок для кожного ризику, заданих у таблиці 3.3, за формулою (3.9):

$$R_i = k_{i1} \cdot k_{i2}, \quad (3.9)$$

де $k_{ij} \in (0; 1], i = \overline{1, n}, j \in \{1, 2\}$;

– M – класичний метод матриці ризиків [4].

Таблиця 3.3 – Матриця з експертними оцінками ризиків проєкту за критеріями K_1, K_2 [розроблено автором]

Ризики проєкту	K_1	K_2	R	CA
A_1	k_{11}	k_{12}	R_1	CA_1
A_2	k_{21}	k_{22}	R_2	CA_2
...
A_n	k_{n1}	k_{n2}	R_n	CA_n

В моделі (3.8) F – функціональна залежність, яка визначає відповідність між елементами A_i множини ризиків проєкту A і елементами C_j з множини рівнів C , що задається співвідношеннями:

$$A \xrightarrow{F} C, \quad (3.10)$$

$$F(A_i) = CA_i = \begin{cases} C_1, & \text{якщо } R_i \in (0; r_1], \\ C_2, & \text{якщо } R_i \in (r_1; r_2], \quad i = \overline{1, n}, \\ C_3, & \text{якщо } R_i \in (r_2; 1], \end{cases} \quad (3.11)$$

де r_j – верхнє граничне значення для кожного рівня ризику $C_j, j \in \{1, 2\}$, яке визначається експертами, або обчислюються автоматично так, щоб розподіл кількості значень виду

$$k = k_1 \cdot k_2, \quad (3.12)$$

де $k_j \in (0; 1], j \in \{1, 2\}$, був рівним для кожного інтервалу:

$$(0; r_1], (r_1; r_2], (r_2; 1]. \quad (3.13)$$

У цьому випадку величини r_1, r_2 можна знайти або експериментальним шляхом із заданою точністю, або аналітично, враховуючи геометричну

інтерпретацію залежності виду (3.12) коли r_1, r_2 деякі фіксовані значення (рис. 3.8).

Зафіксуємо r_1, r_2 як значення, що задовольняють умову: $0 < r_1 < r_2 < 1$. Тоді з (3.14) одержимо рівняння двох кривих

$$k_2 = \frac{r_1}{k_1}, k_2 = \frac{r_2}{k_1}, \quad (3.14)$$

$k_j \in (0; 1], j \in \{1, 2\}$, що є гілками гіпербол (рис. 3.8).

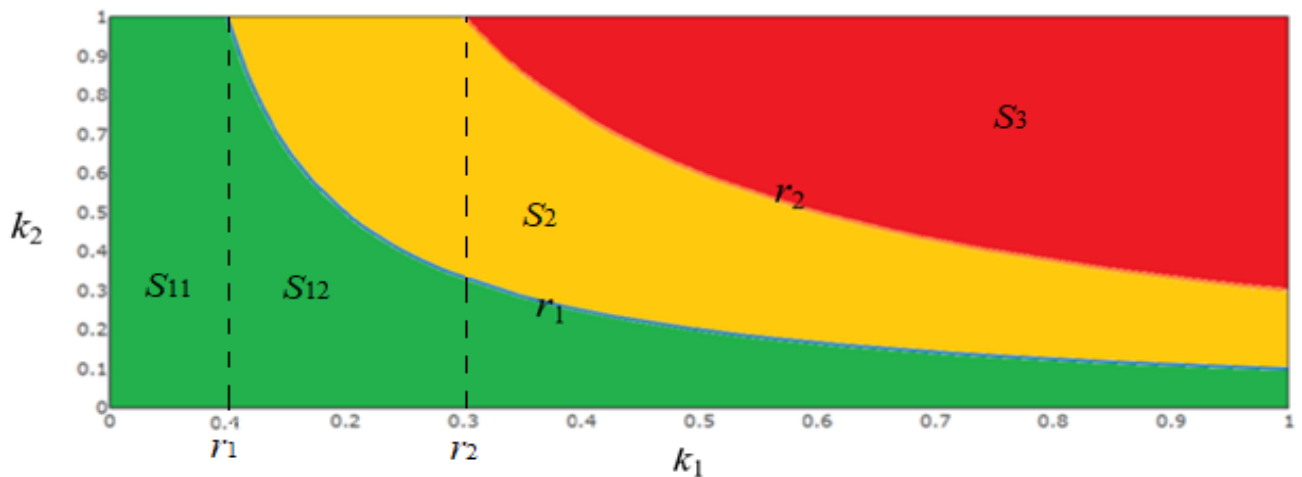


Рисунок 3.8 – Розбиття матриці ризиків на три області рівнів ризиків з межами r_1, r_2 [розроблено автором]

Знайдемо площі S_1, S_2, S_3 відповідних областей рівнів ризику, що утворилися графіками функцій (3.14) у двовимірному квадраті $(0; 1] \times (0; 1]$ з площею $S = 1$:

$$S_1 = S_{11} + S_{12} = r_1 \cdot 1 + \int_{r_1}^1 \frac{r_1}{k_1} dk_1 = r_1 + r_1 \ln k_1 \Big|_{r_1}^1 =$$

$$= r_1 + r_1 (\ln 1 - \ln r_1) = r_1 - r_1 \ln r_1 = r_1 (1 - \ln r_1),$$

$$S_3 = (1 - r_2) \cdot 1 - \int_{r_2}^1 \frac{r_2}{k_1} dk_1 = (1 - r_2) - r_2 \ln k_1 \Big|_{r_2}^1 = 1 - r_2 (1 + \ln r_2),$$

$$S_2 = 1 \cdot 1 - S_1 - S_3.$$

Далі знайдемо значення параметрів r_1, r_2 , що задовольняють умови:

$$S = S_1 + S_2 + S_3,$$

$$S_1 = S_2 = S_3 = 1/3, \quad S_1 = r_1 (1 - \ln r_1),$$

$$S_3 = 1 - r_2 (1 + \ln r_2),$$

$$S_2 = S - S_1 - S_3 = 1 - S_1 - S_3,$$

$$S_1 > 0, S_2 > 0, S_3 > 0.$$

Звідси маємо систему двох логарифмічних рівнянь відносно двох невідомих r_1, r_2 :

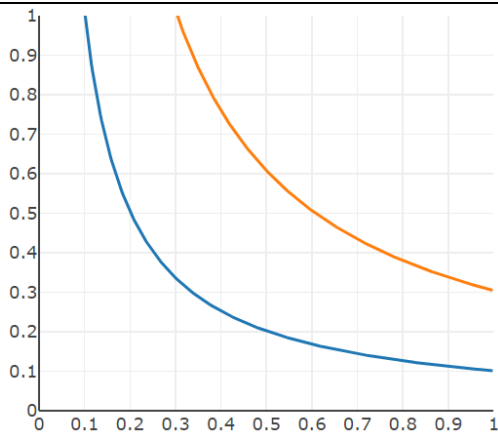
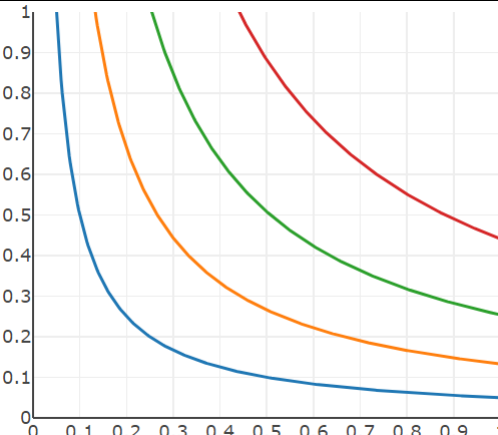
$$\begin{cases} r_1(1 - \ln r_1) = \frac{1}{3}, \\ 1 - r_2(1 + \ln r_2) = \frac{1}{3}, \end{cases}$$

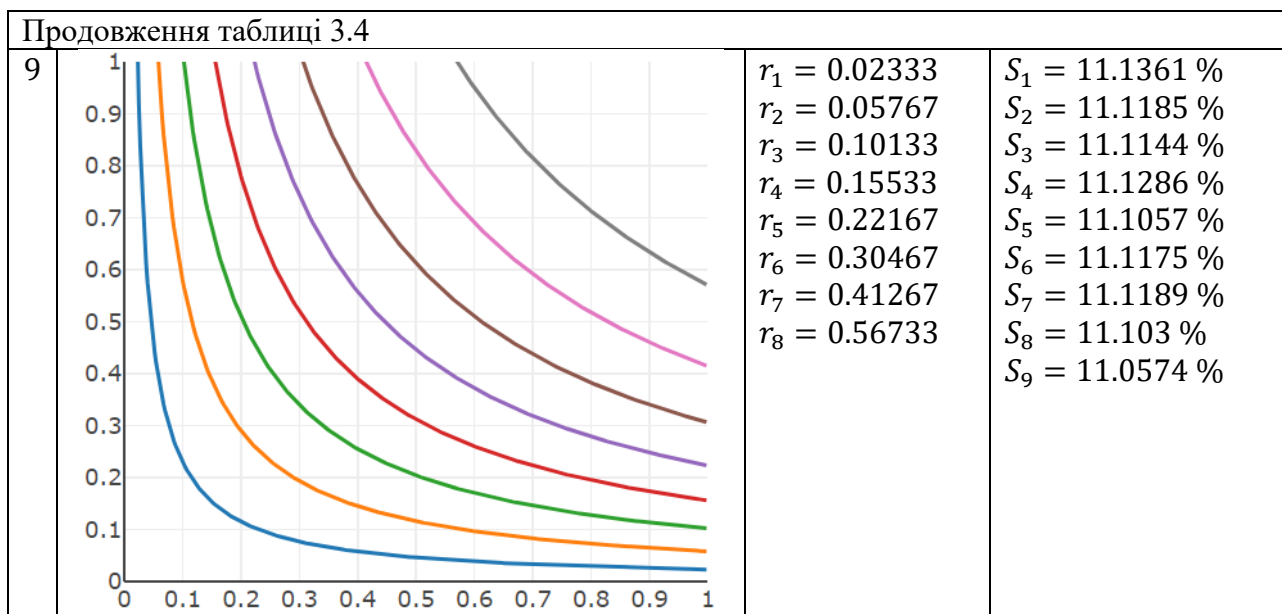
наближеним розв'язком якої є $r_1 \approx 0.1014$, $r_2 \approx 0.3040$.

При $s = 3$ у таблиці 3.4 зображено три області, що відповідають трьом рівням ризику: низькому (а), середньому (b), високому (с) при знайдених граничних значеннях $r_1 \approx 0.101$, $r_2 \approx 0.304$.

Також у таблиці 3.4 наведено верхні граничні значення параметрів $r_j, j = \overline{1, s-1}$ при $s \in \{3, 5, 9\}$ (тобто коли використовується відповідно 3, 5 і 9 рівнів ризиків), знайдених експериментально, і розбиття площі S на відповідну кількість областей $S_j, j = \overline{1, s}$ з приблизно рівними площами.

Таблиця 3.4 – Розбиття площі S розміру $(0; 1] \times (0; 1]$ на області рівнів ризику з приблизно рівними площами при $s \in \{3, 5, 9\}$ [розроблено автором]

s	Області рівнів ризиків	Параметри r_j	Площі S_j
3		$r_1 = 0.101$ $r_2 = 0.304$	$S_1 = 33.3442 \%$ $S_2 = 33.3234 \%$ $S_3 = 33.3324 \%$
5		$r_1 = 0.05$ $r_2 = 0.13225$ $r_3 = 0.25225$ $r_4 = 0.438$	$S_1 = 20.0049 \%$ $S_2 = 20.0035 \%$ $S_3 = 19.9912 \%$ $S_4 = 19.9948 \%$ $S_5 = 20.0057 \%$



3.5 Процедура парних порівнянь ризиків

Як було зазначено, у комбінованому методі управління ризиками з метою визначення пріоритетів ризиків проєкту використовується метод аналізу ієрархій.

Одним з найбільш відповідальних і досить непростих для експертів етапів цього методу є процедура парних порівнянь альтернатив за заданими критеріями, при цьому для порівнянні використовується відома 9-бальна шкала Сааті [48].

У цій процедурі формується матриця парних порівнянь:

$$AC = (a_{ij}), \quad i, j = 1, n, \quad (3.15)$$

яка має такі властивості:

- вона *діагональна*, тобто $a_{ii} = 1, i = \overline{1, n}$;
- вона *обернено-симетрична*, тобто елементи, симетричні відносно головної діагоналі, пов'язані залежністю: $a_{ij} = 1/a_{ji}, i, j = \overline{1, n}$.

За методом аналізу ієрархій [48] для матриці парних порівнянь A обраховується величина узгодженості оцінок експерта на основі показника CR – відношення однорідності (узгодженості) матриці парних порівнянь A , який вказує на те, наскільки узгоджені судження експерта про об'єкти порівняння:

$$CR = CI/RI, \quad (3.16)$$

де:

$CI = (\lambda_{max} - n)/(n - 1)$ – індекс однорідності (узгодженості) матриці парних порівнянь, n – кількість елементів, що порівнюються між собою;

λ_{max} – максимальне власне значення матриці парних порівнянь A ;

RI – середнє значення (математичне сподівання) індексу однорідності випадковим чином складеної обернено-симетричної матриці з відповідними оберненими величинами елементів за шкалою від 1 до 9, що базується на експериментальних даних. Відповідні значення параметра RI для таких квадратних матриць $n \times n$, де $n = \overline{1; 50}$ можна знайти, наприклад у [49].

Значення CR , знайдене за формулою (2.18), вважається допустимим, якщо воно не перевищує 0.1. Тому, якщо $CR \leq 0.1$, то матриця парних порівнянь A (3.15) вважається узгодженою. Інакше матриця парних порівнянь A вважається неузгодженою і експерту потрібно повторити процедуру порівняння. Зауважимо, що коли матриця A транзитивна, тобто $a_{ij} = a_{ik}a_{kj}$, $i, j, k = \overline{1, n}$, то умова узгодженості думок експерта $CR \leq 0.1$ обов'язково виконується [50].

Розглянемо процедуру, яка буде використана при реалізації методу аналізу ієрархій при парному порівнянні ризиків за заданими критеріями, для автоматизації цього процесу.

Ідея реалізації цієї процедури полягає у тому, щоб використати проведену важливу і кропітку роботу експертів при заповненні таблиці 1 для побудови матриць парних порівнянь заданих ризиків за різними критеріями, що їх характеризують. При цьому мають виконуватися всі властивості притаманні матриці A .

Для деякого критерію K_j множину експертних оцінок для ризиків A_i ($i = \overline{1, n}$), що порівнюються, позначимо $MK_j = \{k_{1j}, k_{2j}, \dots, k_{nj}\}$, $k_{ij} \neq 0, i = \overline{1, n}$ (див. табл. 1). Для спрощення покладемо $MK_j = \{mk_1, mk_2, \dots, mk_n\}$, де $mk_i = k_{ij} \neq 0, i = \overline{1, n}$ при фіксованому j .

Тоді матриця парних порівнянь CK_j альтернатив A_i за критерієм K_j утворюється на базі оцінок MK_j і має такий вигляд:

$$ACK_j = \begin{array}{c|ccccc} \text{Критерій } K_j & A_1 & A_2 & \dots & A_n \\ \hline A_1 & a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ A_2 & a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_n & a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{array} \quad (3.17)$$

де

$$a_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{[d_{ij}]}, & 0 < d_{ij} < 1, \\ [d_{ij}], & d_{ij} \in [1, 9], \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, n}, \\ 9, & d_{ij} > 9, \end{cases} \quad (3.18)$$

а величина $d_{ij} = \frac{mk_i}{mk_j}$ визначає в скільки разів оцінка mk_i більше (якщо $d_{ij} > 1$), чи менше (якщо $d_{ij} < 1$) оцінки mk_j , чи вони рівні ($d_{ij} = 1$).

Величина d_{ij} дає можливість оцінити перевагу i -ої альтернативи, що має експертну оцінку mk_i , над j -ою альтернативою, що має експертну оцінку mk_j , чи навпаки: перевагу j -ої альтернативи над i -ою альтернативою.

Тоді оцінки для парного порівняння a_{ij} , що визначаються за формулою (3.18), є такими, що матриця (3.17) задовольняє властивостям матриці парних порівнянь (3.15).

3.6 Комбінований метод розв'язання задачі визначення рівнів ризиків та їх пріоритетів

Вхідними даними методу, що реалізує метод визначення рівнів та пріоритетів ризиків, у відповідності до моделі (3.2) є:

- назва задачі, для якого буде здійснюватися процес управління ризиками, а також певна інформація про особливості цього проєкту та особу, яка приймає рішення;

- $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ – множина ризиків, яка формується користувачем у режимі діалогу під конкретну задачу, або обирається з існуючих шаблонів з попередніх задач управління ризиками, наприклад: A_1 – економічні ризики, A_2 –

ринкові ризики, A_3 – ризик зміни вимог до ІТ-проєкту, A_4 – ризик невідповідності програмного забезпечення вимогам замовника, A_5 – ризик кібербезпеки;

– $C = \{C_1, C_2, \dots, C_s\}$ – множина рівнів ризику, яка можна бути сформована користувачем у режимі діалогу, або обрана з наявних шкал оцінювання ризику при $s = 3, 5$ або 9 (за замовченням пропонується три рівні ризиків: «низький», «середній», «високий»);

– $K = \{K_1, K_2, \dots, K_m\}$ – множина критеріїв оцінювання ризиків, яка можна бути сформована користувачем у режимі діалогу, або обрані за замовченням два класичних критерії: K_1 – « P - ймовірність появи ризику у проєкті», K_2 – « I - вплив ризику на проєкт».

Основні етапи алгоритму реалізації комбінованого методу визначення рівнів та пріоритетів ризиків проєкту подано на рис. 3.9.

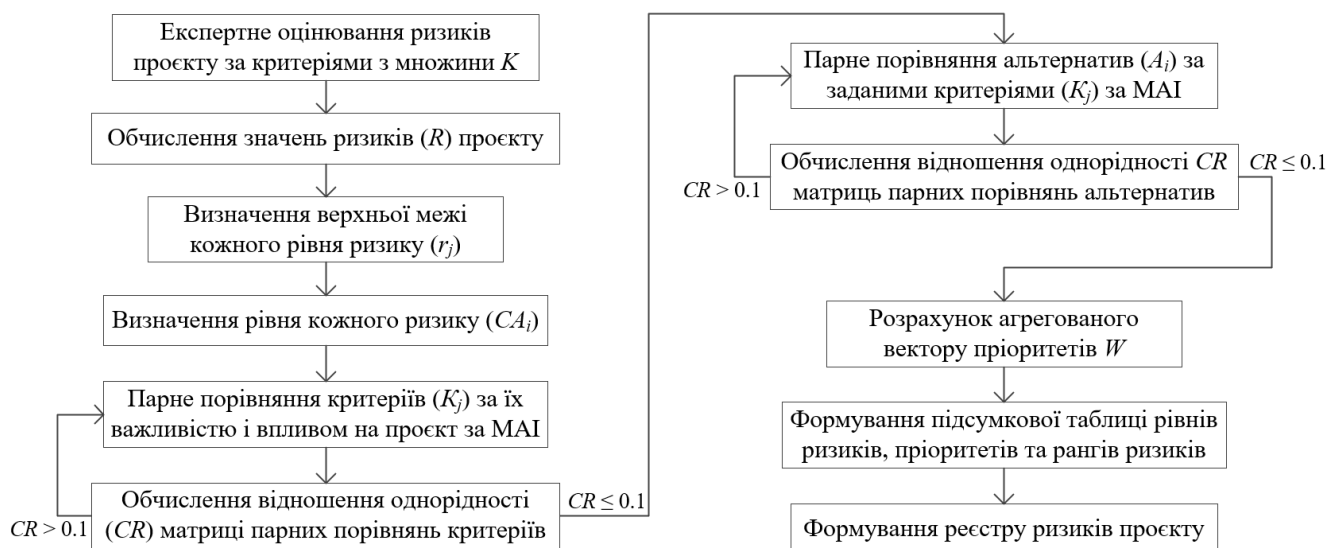


Рисунок 3.9 – Схема алгоритму реалізації комбінованого методу визначення рівнів ризику проєкту та пріоритетів цих ризиків [розроблено автором]

Розглянемо детальніше зазначені на рис. 3.9 етапи алгоритму реалізації комбінованого методу.

Етап 1. Експертне оцінювання ризиків проєкту за критеріями з множини K. Користувач вносить експертні оцінки ризиків за критеріями з множини K до таблиці виду 3.2. При цьому, якщо залучається група експертів з управління проєктами, то оцінки $k_{ij} \in (0; 1]$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$, є агрегованими оцінками, що можуть бути отримані за допомогою методів експертного оцінювання.

Етап 2. Обчислення значень ризиків (R) проєкту. Значення ризиків R_i обраховуються у відповідності до наявних критеріїв і експертних оцінок для кожного ризику A_i ($i = \overline{1, n}$) за формулою (3.3) за даними, одержаними на етапі 1.

Етап 3. Визначення верхньої межі кожного рівня ризику (r_j). Верхні граничні значення r_j для кожного рівня ризику C_j ($j = \overline{1, s}$), або визначається користувачем (експертом), або обчислюються автоматично за процедурою, описаною вище.

Етап 4. Визначення рівня кожного ризику (CA_i). У відповідності до співвідношення виду (3.4) визначається належність ризиків A_i , $i = \overline{1, n}$, до певного рівня ризику C_j , $j = \overline{1, s}$, тобто визначаються значення параметрів CA_i , $i = \overline{1, n}$, які заносяться до таблиці виду 1, а одержані результати візуалізуються або у вигляді матриці ризиків при $m = 2$ (див. рис. 3.8), або у вигляді гістограми при $m > 2$ (див. рис. 3.7).

Етап 5. Парне порівняння критеріїв (K_j) за їх важливістю і впливом на проєкт за МАІ. Якщо користувач (експерт) вважає, що критерії K_j не є рівноважливими, тоді він здійснює парне порівняння критеріїв K_j за шкалою Сааті [48], заповнюючи відповідну матрицю CK , яка має задовольняти умовам матриці (3.15):

$$CK = (e_{ij})_{i=\overline{1, m}, j=\overline{1, m}}.$$

За замовчуванням вважається, що всі критерії K_j є рівноважливими, тобто матриця парних порівнянь CK є одиничною.

Після цього матриця CK перевіряється на узгодженість шляхом розрахунку параметра CR за формулою (3.16). Якщо $CR \leq 0.1$, то матриця CK вважається узгодженою. Далі обчислюється вектор:

$WK = (wk_j)_{j=\overline{1, m}}$ – нормований вектор пріоритетів критеріїв K_j , $j = \overline{1, m}$ за їх важливістю і впливом на проєкт.

Після цього відбувається перехід до етапу 6.

Інакше (при $CR > 0.1$) матриця CK вважається неузгодженою і експерту потрібно повторити процедуру порівняння (повторити етап 5).

Етап 6. Парне порівняння альтернатив (A_i) за заданими критеріями (K_j) за МАІ. У результаті автоматизованої процедури парних порівнянь альтернатив (A_i) за заданими критеріями (K_j) за співвідношеннями (3.17), (3.18) буде одержано такі об'єкти:

- CAK_j – матриця парних порівнянь альтернатив з множини A за критерієм $K_j, j = \overline{1, m}$;
- $W^{(j)} = (w_i^{(j)})_{i=\overline{1, n}}$ – нормований вектор пріоритетів альтернатив A_i ($i = \overline{1, n}$) за критерієм $K_j, j = \overline{1, m}$.

Етап 7. Розрахунок агрегованого вектору пріоритетів W . Здійснюється обчислення вектору пріоритетів W , що відповідає головному критерію порівняння альтернатив – визначення пріоритетів ризиків щодо їх впливу на проєкт в цілому з метою визначення послідовності їх запобігання та усунення. Розрахунок проводиться за формулою [48]:

$$W = [W^{(1)}, W^{(2)}, \dots, W^{(m)}] \cdot WK.$$

Етап 8. Формування підсумкової таблиці рівнів ризиків, пріоритетів та рангів ризиків. За результатами застосування методу формується підсумкова таблиця, що містить рівні ризиків проєкту, визначених за узагальненим методом матриці ризиків, пріоритетів та рангів цих ризиків, визначених за допомогою МАІ (таблиця 3.5).

Таблиця 3.5 – Підсумкова таблиця визначення рівнів ризиків, пріоритетів та рангів ризиків проєкту [розроблено автором]

Назва ризиків (A)	Значення ризиків (R)	Рівень ризиків (CA)	Вектор пріоритетів ризиків за МАІ (W)	Ранги ризиків (RR)
...

Ранг RR альтернатив (ризиків) (A_i) визначається за допомогою сортування вектору пріоритетів альтернатив W за спаданням з подальшим присвоєнням рангів. При цьому ризик, значення пріоритету якого у векторі W найбільше, має ранг 1 і т.д.

Етап 9. Формування реєстру ризиків проєкту. На цьому етапі виводиться реєстр ризиків для проєктів у відповідності до ISO 9001 [51], ISO 27001 [39] і загальних правил та принципів управління проєктами [41], [52]. Цей реєстр містить множину заходів $RPE = \langle RP, RE \rangle$ щодо запобігання та усунення ризиків проєкту у вигляді таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Таблиця реєстру ризиків [розроблено автором]

Назва ризиків	Засоби запобігання ризиків (RP)	Засоби усунення ризиків (RE)
...

Схему процесу заповнення реєстру ризиків продемонстровано на рисунку 3.10. Засоби запобігання та усунення типових ризиків в ІТ-проєктах надано в Додатку Д.

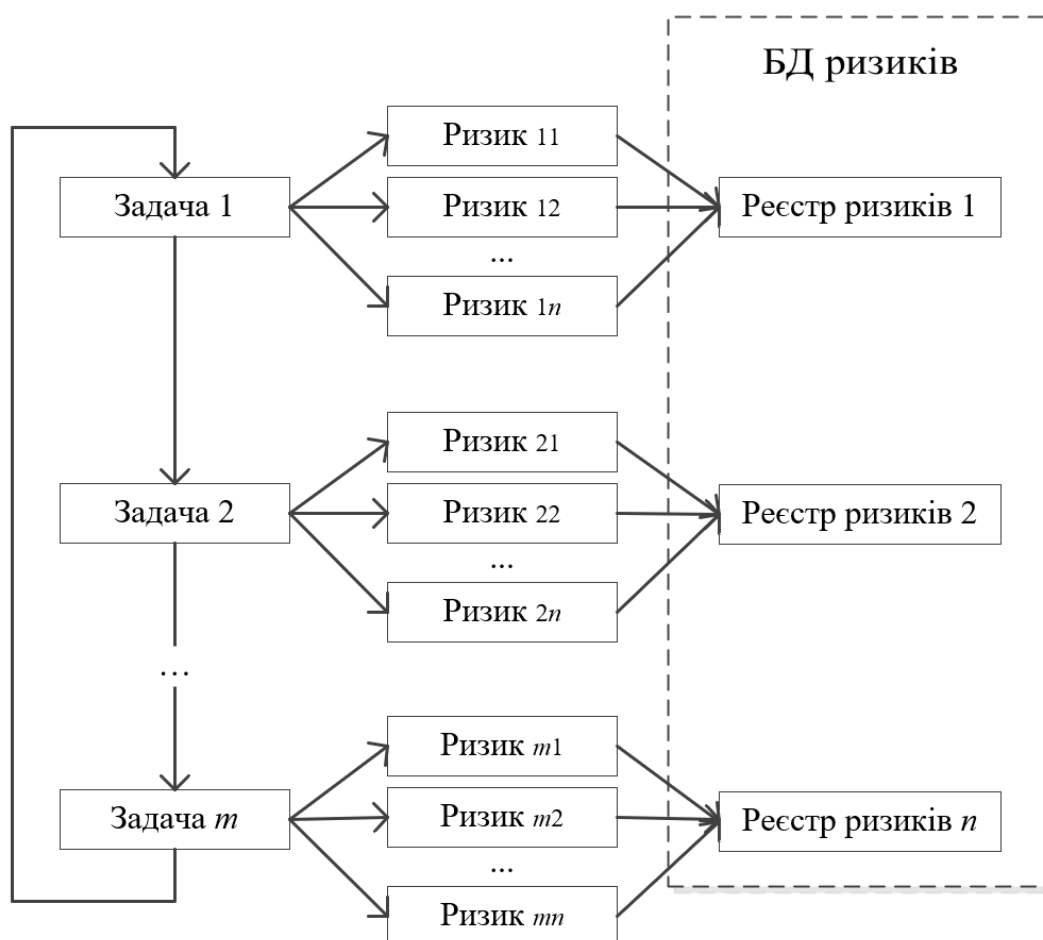


Рисунок 3.10 – Схема процесу заповнення реєстру ризиків [розроблено автором]

Як видно з рисунку 3.10, для задач проєкту проводиться ідентифікація ризиків, що потенційно можуть вплинути на якість результатів, строки виконання або ресурси. Виявлені ризики структуруються у відповідні реєстри, які включаються до єдиної бази даних ризиків. Це дозволяє системно управляти ризиками на всіх етапах проєкту, своєчасно застосовувати заходи реагування та підвищити загальну надійність реалізації проєктних задач.

3.7 Висновки до розділу 3

У межах третього розділу наведено постановку задачі управління ризиками в загальному виді та для задачі визначення рівнів ризиків та їх пріоритетів.

Проведено аналіз засобів управління ризиками, зокрема стандартів, методологій і методів та розроблено відповідну діаграму взаємозв'язку між ними. Наведено схему процесу управління ризиками. Проведено порівняння програмних засобів для управління ризиками, здійснено аналіз їх переваг та недоліків. Продемонстровано схему процесу управління ризиками.

Проаналізовано переваги та недоліки стандартів для управління ризиками ISO 31000, NIST 800-53 та PMBOK. В результаті аналізу було встановлено, що для управління ризиками найбільше підходить стандарт ISO 31000. Даний стандарт в комбінації зі стандартом ISO 31010 є найбільш адаптивним, оскільки на початкових етапах його впровадження він легше інтегрується в існуючі системи. Цей стандарт може слугувати основою для подальшого впровадження інших стандартів, які будуть доповнювати один одного завдяки наявності різногалузевих норм у рамках ISO.

У межах задачі визначення рівнів ризиків та їх пріоритетів проведено аналіз існуючих підходів щодо управління ризиками, зокрема проаналізовано відповідні стандарти, методології та методи. Одним з популярних методів управління ризиками проєктів, що широко використовується на практиці, є метод матриці ризиків. Разом з тим, поряд з його перевагами такими, як наукова обґрунтованість і ефективність, широта і простота застосування, можливість візуалізації результатів, існують певні проблеми і обмеження при його використанні, які проаналізовані в цьому розділі. У таких умовах постає проблема розробки методу,

який би не мав зазначених обмежень методу матриці ризиків і надавав можливість менеджеру проєктів досить точно класифікувати ризики за різними рівнями і ступенями важливості, при цьому не обмежуючись лише двома критеріями впливу на проєкт («ймовірність виникнення ризику» і «вплив ризику на проєкт») та трьома рівнями ризику («низький», «середній», «високий»).

У дослідженні для вирішення цієї проблеми розроблена запропонована інформаційна технологія яка складається з: моделі управління ризиками проєкту (Project Risk Management Model); методу визначення рівнів ризиків та їх пріоритетів, який є комбінацією модифікованого методу матриці ризиків і методу аналізу ієрархій та веб-ресурсу, що забезпечує автоматизацію процесу класифікації ризиків та визначення пріоритетів ризиків у режимі онлайн.

Для комбінованого методу розв'язання задачі визначення рівнів ризиків та їх пріоритетів побудовано модель управління ризиками проєкту (Project Risk Management Model), яка містить:

- вхідну інформацію про наявні ризики проєкту, рівні ризиків, критерії оцінювання ризиків, експертні оцінки для кожного ризику за заданими критеріями;
- процедуру визначення належності ризиків проєкту до певного рівня ризиків, процедуру визначення пріоритетів ризиків проєкту за допомогою методу аналізу ієрархій;
- вихідні параметри: інформація про належність ризиків проєкту до відповідних рівнів ризиків; вектор пріоритетів ризиків проєкту і вектор їх рангів; реєстр ризиків з переліком заходів щодо запобігання та усунення ризиків проєкту.

У дослідженні на базі PRMM запропоновано і обґрунтовано метод для аналізу ризиків проєкту, який є комбінацією модифікованого методу матриці ризиків, що надає можливість з високою точністю визначити рівень ризику за більш широкою шкалою і більшою кількістю критеріїв, ніж традиційний метод матриці ризиків, та методу аналізу ієрархій, за допомогою якого визначаються пріоритети ризиків та їх ранги.

До переваг запропонованої інформаційної технології можна віднести те, що поєднання модифікованого методу матриці ризиків, де вхідні дані формуються на

основі експертних оцінок (суб'єктивно), з методом аналізу ієрархій, де заповнення матриць парних порівнянь альтернатив (ризиків) за критеріями і визначення пріоритетів ризиків здійснюється автоматично на основі математичних розрахунків (об'єктивно), надає користувачам більш широкі можливості для аналізу ризиків проєктів у порівнянні з іншими методами.

Результати досліджень третього розділу опубліковані в роботах [53]-[56].

Список використаних джерел до розділу 3

1. Sosnovska, O., Dedenko, L (2019). Risk management as an instrument for providing the stable functioning of the enterprise in understanding condition. European scientific journal of Economic and Financial innovation, 1(3), 70-79. DOI: <https://doi.org/10.32750/2019-0106>.
2. Heldman, K. (2005). Project Manager's Spotlight on Risk Management (Project Managers Spotlight): Wiley. 239 p.
3. ISO 31000: 2018. Risk management – Guidelines. Official edition. 2018. 16 p. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:31000:ed-2:v1:en> (дата звернення: 25.05.2025).
4. Cox A. L., Jr.: What's Wrong with Risk Matrices? Risk Analysis (28), 497–512. (2008). DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2008.01030.x>.
5. С.Д. Бушуєв, Д.А. Бушуєв, В.Б. Бушуєва, А.В. Пузійчук, В.Б. Яковенко. Когнітивні механізми управління складними системами. Монографія, К., 2023, 376 с.
6. Проактивне управління програмами розвитку фінансових установ в умовах турбулентного оточення / Н. С. Бушуєва, Р. Ф. Ярошенко, Т. О. Ярошенко // Управління розвитком складних систем. 2011. Вип. 7. С. 16-19. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Urss_2011_7_5 (дата звернення: 25.05.2025).
7. Данченко О. Б. Сучасні підходи до управління бізнесом: розділ 2 кол. монографії / Данченко О. Б., Польшаков І. В., Поскрипко Ю. А. // Управління проєктами, програмами та проєктноорієнтованим бізнесом: колективна монографія. К.: Університет КРОК, 2012. С. 24-42.

8. Teslia I., Yehorchenkova N., Yehorchenkov O., Kataieva Y., Khlevnyi A., Latysheva T., Veretelnyk V., Ohirko I., Khlevna I., Chastokolenko I. Development of the concept of construction of the project management information standard on the basis of the primadoc information management system // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 1, Issue 3-115. P. 53–65. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253299>.
9. Морозов В.В., Бушуєв С.Д. Динамічне лідерство в управлінні проектами: монографія, К.: Принт, 2000, 312 с.
10. Zachko O.B., Kobylkin D.S., Zachko I.H. Models of infrastructure project management by means of hybrid technologies. Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: Strategic management, portfolio, program and project management. Kh.: NTU «KhPI», 2022. № 2 (6). С. 35–38. ISSN 2311-4738 (print), ISSN 2413-3000 (online). DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-3000.2022.6.7>.
11. Прокопенко Т. О. Інформаційні технології управління організаційно-технологічними системами: монографія / Т. О. Прокопенко, А. П. Ладанюк. Черкаси: Вертикаль, видавець Кандич С. Г., 2015. 224 с.
12. Данченко, О. Б., Бедрій Д. І., Семко І. Б. Концептуальна модель формування високоефективної команди наукового проекту. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами. Харків : НТУ «ХПІ», 2018. № 1 (1277). С. 51-56. DOI: 10.20998/2413-3000.2018.1277.8.
13. Розробка моделі збалансованої оцінки успішності проектів на основі методичних індикаторів цінності. Олех Т.М, Колеснікова К.В., Мезенцева О.О., Гогунський В.Д. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами. 2021. № 1(3), С. 39-47.
14. Геєць В. М. Феномен нестабільності – виклик економічному розвитку. Наукові монографії. Київ: ВД «Академперіодика», 2020. 456 с. ISBN 978-966-360-403-9. DOI: <https://doi.org/10.15407/akademperiodyka.403.456>.

15. Вітлінський В. В., Наконечний С. І., Шарапов О. Д. Економічний ризик і методи його вимірювання: підручник. Київ: ІЗМН, 1996. 400 с.
16. Вітлінський В. В., Великоіваненко Г. І. Ризикологія в економіці та підприємстві: монографія. К.: КНЕУ, 2004. 480 с.
17. Данченко О. Б., Занора В. О. Проектний менеджмент: управління ризиками та змінами в процесах прийняття управлінських рішень : монографія / О. Б. Данченко, В. О. Занора. Черкаси : ПП Чабаненко Ю.А., 2019. 278 с.
18. Rychlik, A., Semko, O., Bedrii, D., Marshak, O., Nesterenko, A. (2024). Information System for Management of Information Risks in Digital Transformation Projects. In: Faure, E., *et al.* Information Technology for Education, Science, and Technics. ITEST 2024. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 222. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-71804-5_1.
19. Чумаченко І.В. Система управління ризиками проектів підприємства / І.В. Чумаченко, М.О. Латкін, Т.І. Бондарєва, Н.В. Доценко: навч. посібник з грифом МОН України. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т “Харк. авіац. ін-т”, 2012. 232 с.
20. Kononenko I. Project scope optimization model and method on criteria profit, time, cost, quality, risk. Integrating Project Management Standards / I. Kononenko, V. Fadeyev, M. Kolisnyk // Proceedings of the 26th IPMA World congress, 29-31 October 2012. – Hersonissos, Crete, Greece, 2012. p. 286-292.
21. Lukianov, D., Mazeika, M., Gogunskii, V., & Kolesnikova, K. (2020). SWOT analysis as an effective way to obtain primary data for mathematical modeling in project risk management. In T. Hovorushchenko, A. Pakstas, V. Vychuzhanin, H. Yin, & N. Rudnichenko (Eds.), *Proceedings of the 9th International Conference "Information Control Systems & Technologies" (ICST 2020)* (pp. 79–92). CEUR Workshop Proceedings, Vol. 2711. CEUR-WS.org. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2711/paper7.pdf>
22. Tryhuba A., Boyarchuk V., Tryhuba I., Ftoma O., Padyuka R., Rudynets M. Forecasting the risk of the resource demand for dairy farms basing on machine learning. Proceedings of the 2nd International Workshop on Modern Machine Learning Technologies and Data Science (MoMLeT+DS 2020). Volume I: Main Conference, Lviv-Shatsk, Ukraine, June 2-3, 2020. P. 327-340.

23. O. Zachko, O. Kovalchuk, D. Kobylkin and V. Yashchuk. Information technologies of HR management in safety-oriented systems. 2021 IEEE 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), LVIV, Ukraine, 2021, pp. 387-390, ISSN: 2766-3639 (Electronic), 2766-3655 (Print on Demand). DOI: <https://doi.org/10.1109/CSIT52700.2021.9648698>.
24. Bernstein P. L.: Against the gods: the remarkable story of risk. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2012. 396 p.
25. Taleb N.: The black swan: the impact of the highly improbable. Random House, New York. 2007. 401 p.
26. Gigerenzer G.: Risk savvy: how to make good decisions. Penguin Books, Limited. 2015. 336 p.
27. Kaplan R. S.: The balanced scorecard: translating strategy into action. Mass : Harvard Business School Press, Boston. 1996. 330 p.
28. Hubbard D. W.: Failure of risk management: why it's broken and how to fix it. Wiley & Sons, Incorporated, John. 2020. 384 p.
29. LaValle, Irving H., and Fishburn P.C.: A Correction and its Genesis, Journal of Risk and Uncertainty 11. 1995. P. 275–277.
30. LaValle, Irving H., and Fishburn P.C.: On the Varieties of Matrix Probabilities in Nonarchimedean Decision Theory, Journal of Mathematical Economics 25. 1996. P. 33–54
31. Slovic P.: Feeling of risk: new perspectives on risk perception. Taylor & Francis Group, (2013). 456 p.
32. Matsuda T.: Matrix quadratic risk of orthogonally invariant estimators for a normal mean matrix. Japanese Journal of Statistics and Data Science (2023). DOI: <https://doi.org/10.1007/s42081-023-00216-z>.
33. Karahan V., Aydoğmuş E., Canpolat E.: Risk Analysis and Risk Assessment in Limestone Quarry: L Matrix Method (2023). 366 p.
34. Ruan X., Yin Z., Frangopol DM. Risk Matrix Integrating Risk Attitudes Based on Utility Theory. Risk Anal 35(8), 1437–1447. (2015) DOI: <https://doi.org/10.1111/risa.12400>.

35. Duan, Y., Zhao, J., Chen, J., Bai, G.: A Risk Matrix Analysis Method Based on Potential Risk Influence: A Case Study on Cryogenic Liquid Hydrogen Filling System, Process Safety and Environment Protection (2016). DOI: <http://doi.org/10.1016/j.psep.2016.03.022>.
36. Wen-Kai K. H., Show-Hui S. H., Wen-Jui T.: Evaluating the risk of operational safety for dangerous goods in airfreights – A revised risk matrix based on fuzzy AHP. Transportation Research Part D: Transport and Environment 48, 235–247. (2016) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.08.018>.
37. Flage, R., Røed, W., A reflection on some practices in the use of risk matrices. 11th International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference and the Annual European Safety and Reliability Conference 2012, PSAM11 ESREL 2012. 881–891 (2012).
38. IEC 31010:2019 Risk management – Risk assessment techniques. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2019. 264 p.
39. ISO/IEC 27001:2022 – Information security, cybersecurity and privacy protection – Information security management systems – Requirements. URL: <https://www.iso.org/standard/27001> (дата звернення: 25.05.2025).
40. National Institute of Standards and Technology Special Publication 800-53. Rev. 5. 2020. 492. DOI: <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-53r5>.
41. Project Management Institute. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide) (7th ed.). Project Management Institute. 2021. 250. URL: <https://www.pmi.org/standards/pmbok> (дата звернення: 25.05.2025).
42. ДСТУ IEC/ISO 31010:2013 Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику (IEC/ISO 31010:2009, IDT) [Чинний від 2014-07-01]. Офіц. вид. Київ: Міністерство економічного розвитку України, 2015. 80 с.
43. Onspring Technologies. URL: <https://onspring.com/> (дата звернення: 25.05.2025).
44. Checkbox. URL: <https://www.checkbox.ai/> (дата звернення: 25.05.2025).
45. Qualityze Inc. URL: <https://www.qualityze.com/> (дата звернення: 25.05.2025).
46. Wrike. URL: <https://www.wrike.com/> (дата звернення: 25.05.2025).
47. AuditBoard. URL: <https://www.auditboard.com/> (дата звернення: 25.05.2025).

48. Thomas L. Saaty, The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation; McGraw-Hill International Book Company, 1980, 287 p.
49. Witayakiattilerd W. Fuzzy decision-making process. Fuzzy logic for business and finance 6 (2024) URL: https://www.researchgate.net/publication/378770550_FUZZY_LOGIC_FOR_BUSINESS_AND_FINANCE_EP_6_Fuzzy_Decision-making_Process (дата звернення: 25.05.2025).
50. Rotshtein A., Shtovba S. Fuzzy multicriteria analysis of variants with the use of paired comparisons. Journal of Computer and Systems Sciences International 40(3). 2001. 499–503.
51. ISO 9001:2015. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9001:ed-5:v1:en> (дата звернення: 25.05.2025).
52. Rasmusson J.: The agile samurai: how agile masters deliver great software. The Pragmatic Bookshelf. Raleigh, North Carolina (2010).
53. Максимов, А. (2025). Аналіз стандартів управління ризиками та їх використання в ІТ-проектах. *Управління розвитком складних систем*, (61), 66–75. Київ: КНУБА. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2025.61.66-75>.
54. Maksymov, A., Tryus, Y. (2024). Information Technology for Determining Risk Levels and Their Priorities in Project Management. In: Faure, E., et al. Information Technology for Education, Science, and Technics. ITEST 2024. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 222. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-71804-5_7.
55. Максимов А.Є. Комбінований метод управління ризиками проєкту та його реалізація в системі підтримки прийняття рішень. Тези доповідей IX Міжнародної науково-практичної конференції з проблем вищої освіти і науки «Інформаційні технології в освіті, науці і виробництві (ІТОНВ-2023) (25-26 травня 2023 року). Луцьк: відділ іміджу та промоції ЛНТУ, 2023. С. 246-250.
56. Максимов А.Є., Триус Ю.В. Інформаційна технологія визначення рівнів ризиків та їх пріоритетів в управлінні проєктами. Тези доповідей VII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології в освіті, науці і техніці» (ІТОНТ-2024), (Черкаси, 23-24 травня 2024 р.) [Електронний ресурс]. Черкаси : ЧДТУ, 2024. С. 111-114. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14766662>.

РОЗДІЛ 4

ЗАДАЧІ, МОДЕЛІ І МЕТОДИ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В УМОВАХ РИЗИКУ, НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ТА НЕЧІТКОЇ ІНФОРМАЦІЇ

4.1 Задача прийняття рішень в умовах ризику і методи її розв'язання

Прийняття рішень в умовах ризику є однією з ключових задач у теорії прийняття рішень, економіці, менеджменті, фінансах та інших сферах діяльності людини. Особливість такої задачі полягає в тому, що особа або організація, яка приймає рішення (суб'єкт прийняття рішень), стикається з множиною альтернативних варіантів дій, кожен з яких пов'язаний із випадковими наслідками. Основна характеристика умов ризику – це наявність об'єктивно відомих ймовірностей настання тих чи інших результатів [1].

Основною відмінністю задачі прийняття рішень в умовах ризику від аналогічної задачі в умовах невизначеності є наявність відомої ймовірнісної характеристики станів середовища [2].

Розглянемо деякі критерії прийняття рішень у ситуації I_1 , тобто у ситуації прийняття рішень в умовах ризику.

Критерій Байєса. Цей критерій також відомий як критерій середнього значення, ґрунтується на принципі максимізації математичного сподівання заданого оцінного функціонала [3]. Відповідно до цього критерію, оптимальним рішенням (або множиною оптимальних рішень) $\varphi_{k_0} \in \Phi$ вважається те рішення, яке забезпечує найбільше (або найменше) можливе значення математичного сподівання зазначеного функціонала.

Критерій Байєса є одним з найбільш поширених підходів в інформаційній ситуації I_1 . Його застосування є особливо доцільним у ситуаціях, що характеризуються багаторазовою повторюваністю, оскільки в таких випадках досягається максимізація середнього значення корисності (або мінімізація середнього ризику).

Критерій мінімуму дисперсії оцінного функціонала. Дисперсія описує розсіювання випадкових значень оцінного функціонала для рішення φ_k відносно його середнього значення $B^+(\varphi_k, p)$. Сутність критерію мінімізації дисперсії оцінного функціоналу полягає в тому, щоб знайти рішення φ_{k_0} (або множини рішень $\bar{\Phi}$). Основним недоліком цього критерію є те, що дисперсія на рішенні $\varphi_{k_1} \in \Phi$ може виявитися меншою ніж на рішенні $\varphi_{k_2} \in \Phi$, в той час коли $B^+(\varphi_{k_1}, p) < B^+(\varphi_{k_2}, p)$. Інакше кажучи, критерій мінімуму дисперсії з одного боку є допоміжним, а з іншого – його прийняття потребує довизначення й невеликої зміни вигляду дисперсії σ_k^2 [3].

Комбінований критерій. Являє собою інтеграцію критеріїв Байєса та мінімуму дисперсії, що відображає прагнення ОПР одночасно досягти оптимального середнього значення оцінного функціонала (згідно з критерієм Байєса) та мінімізувати його дисперсію. Для реалізації цього критерію потрібно обрати величину λ таку, що $0 \leq \lambda \leq 1$ та виконати обрахунки. Зауважимо, що при цьому значення коефіцієнта λ встановлюють з огляду на те, якому саме критерію (Байєса чи мінімуму дисперсії) потрібно надати більшу перевагу. Якщо $\lambda = 0$, то критерій $k(\varphi_k, p)$, збігається з критерієм Байєса, а коли $\lambda = 1$ – із критерієм мінімуму дисперсії [3].

Критерій максимізації ймовірності розподілу оцінного функціонала. Фіксуємо величину α , яка задовольняє таку умову: $\alpha_1 \leq \alpha \leq \alpha_2$ причому: $\alpha_1 = \min_j \min_k f_{jk}^+, \alpha_2 = \max_j \max_k f_{jk}^+$. Для кожного рішення $\varphi_k \in \Phi$ визначають ймовірність $p(f_{jk}^+ \geq \alpha)$ того, що значення оцінного функціонала буде не меншим за величину α , коли середовище перебуває у стані θ_j й обрано рішення φ_k [3].

Сенс критерію максимізації ймовірності розподілу оцінного функціонала полягає у визначенні рішення $\varphi_{k_0} \in \Phi$ (або множини рішень Φ), для якого ця ймовірність буде максимальною.

При використанні цього критерію орган управління виходить із необхідності прийняття конкретного рівня величини α .

Модальний критерій. Ідея цього критерію полягає в тому, що орган прийняття рішення виходить із найбільш імовірного стану середовища.

Перевагою модального критерію є його простота. По-перше, достатньо лише виявити найбільш імовірні стани середовища, і до того ж немає необхідності навіть знати числові значення цих імовірностей; по-друге, розрахунок значень оцінного функціонала можна виконувати лише для найбільш імовірних станів, що значно підвищує швидкість прийняття рішень. Серед недоліків критерію слід назвати можливість того, що рішення, оптимальне за модальним критерієм, не завжди буде мати найбільше байєсове значення [3].

Критерій мінімальної ентропії математичного сподівання оцінного функціонала. Суть зазначеного критерію полягає в тому, що серед усіх можливих оцінок обирається та, яка мінімізує ентропію розподілу ймовірностей, зосередженого навколо математичного сподівання оцінного функціонала. Це дозволяє отримати найбільш впорядковану або визначену оцінку, з мінімальною невизначеністю щодо результату. Іншими словами, критерій спрямований на те, щоб обрана оцінка була не лише точною, але й стабільною з найменшим ступенем випадковості [3].

4.2 Задача прийняття рішень в умовах невизначеності і методи її розв'язання

Особливість задачі прийняття рішень в умовах невизначеності полягає в тому, що суб'єкт прийняття рішень має справу з множиною альтернативних варіантів дій, наслідки яких залежать від станів середовища, проте ймовірності цих станів або повністю невідомі, або не можуть бути надійно оцінені. У процесі прийняття рішень важливу роль відіграють так звані пасивні умови – фактори зовнішнього середовища, які не піддаються безпосередньому впливу з боку суб'єкта прийняття рішень, але можуть суттєво впливати на результати реалізації обраних альтернатив. Пасивні умови є невід'ємною частиною середовища функціонування системи, і в багатьох випадках вони характеризуються невизначеністю [4, 5].

Найбільш часто у ситуації прийняття рішень в умовах невизначеності використовують такі критерії: критерій Лапласа, критерій Вальда, критерій Севіджа та критерій Гурвіца [3].

Вибір критерію прийняття рішення в умовах повної невизначеності є найскладнішим і найвідповідальнішим етапом процесу розв'язання задачі. При цьому не існує будь-яких загальних порад чи рекомендацій. Вибір критерію ОПР повинна проводити із врахуванням специфіки задачі, що розв'язується, і відповідно до своїх цілей, а також базується на минулому досвіді та власній інтуїції. Зокрема, якщо навіть мінімальний ризик є неприпустимим, то необхідно застосовувати критерій Вальда. Якщо ж навпаки певний ризик може мати місце і ОПР орієнтується на більший виграш – обирають критерій Севіджа.

Критерій Лапласа спирається на *принцип недостатнього підґрунтя*, виходячи з якого всі стани середовища S_j ($j = 1, \dots, m$) є рівномовірними. Відповідно, кожному стану S_j відповідає ймовірність p_j .

Критерій Вальда (мінімакний або максимінний критерій) – це критерій гарантованого результату. Він базується на принципі найбільшої обережності, оскільки вибирають найкращу із найгірших альтернатив A_i . Якщо елементи платіжної матриці e_{ij} характеризують виграш (корисність) ОПР, то для визначення оптимальної альтернативи використовується *максимінний критерій*.

Якщо елементи платіжної матриці характеризують втрати ОПР, то для визначення оптимальної альтернативи використовується *мінімакний критерій*.

Критерій Севіджа (критерій мінімального ризику) пом'якшує надмірну «песимістичність» критерію Вальда шляхом заміни платіжної матриці (виграшів або втрат) матрицею ризиків. Незалежно від того, чи платіжна матриця A є виграшем або втратами, матриця ризиків R_A визначає величину втрат ОПР. Відповідно, до неї можна застосовувати лише мінімакний критерій.

Критерій Севіджа рекомендує в умовах повної невизначеності обирати ту альтернативу A_i , для якої величина ризику набуває найменшого значення у найнесприятливішій ситуації (коли ризик максимальний). Застосування критерію

Севіджа дозволяє уникнути великого ризику в процесі вибору альтернативи, тобто мінімізувати можливі втрати.

Критерій Гурвіца (*критерій песимізму-оптимізму* або *критерій узагальненого максимуму*) охоплює різні підходи до прийняття рішень – від найбільш оптимістичного до найбільш песимістичного (консервативного). Базується на таких двох припущеннях: «зовнішнє середовище» («природа») може знаходитись у найгіршому стані з ймовірністю $(1 - \alpha)$ і у найкращому стані із ймовірністю α , де α – коефіцієнт довіри (*показник оптимізму*).

Якщо $\alpha = 0$, критерій Гурвіца стає консервативним, оскільки його застосування є рівносильним застосуванню критерію Вальда.

Якщо $\alpha = 1$, критерій Гурвіца стає занадто оптимістичним, оскільки його застосування є рівносильним застосуванню *критерію оптимізму* (максимаксу).

Критерій Гурвіца встановлює баланс між випадками крайнього песимізму й крайнього оптимізму шляхом надання їм відповідної ваги $(1 - \alpha)$ та α , де $0 \leq \alpha \leq 1$. Значення α може визначатись у залежності від схильності ОПР до песимізму або оптимізму. Якщо відсутня яскраво виражена прихильність, то вважають $\alpha = 0,5$.

4.3 Задача тайм-менеджменту як задача багатокритеріального прийняття рішень в умовах невизначеності і методи її розв'язання

Керування часом або тайм-менеджмент (від англ. time management) – наука про сукупність методів та технологій організації часу та ефективності його використання для виконання поточних завдань, проєктів та календарних подій [6]. На винахід терміну «тайм-менеджмент» претендує компанія Time Management International. Її засновник, Клаус Меллер винайшов Time Manager – складно влаштований блокнот-щоденник, який можна вважати прабатьком сучасного органайзера [7].

Одним з популярних підходів до розв'язування задач тайм-менеджменту є матриця Ейзенхауера – це метод, який використовує принципи важливості та терміновості для організації пріоритетів та робочого навантаження [8]. Але

критерії класифікації задач у даному випадку є досить абстрактними, тому набуває актуальності застосування додаткового математичного апарату з методів прийняття рішень для визначення пріоритетів задач у межах кожного класу.

Для проєктів з високою невизначеністю (наприклад, стартапи, дослідницькі проєкти) контроль ризиків і часу може бути критичним. Час – це один із трьох ключових елементів «потрійного обмеження» проєкту (час, бюджет, обсяг). Контроль часу забезпечує виконання завдань у потрібні терміни, запобігаючи затримкам і «ефекту доміно» (коли одна затримка впливає на весь проєкт). Значення часу в проєкті може становити до 30-40% загального успіху, особливо в проєктах із жорсткими дедлайнами [8].

У сучасних умовах динамічних модернізаційних перетворень збільшується потреба у підвищенні адаптивності організації, швидкості реагування на зміни при плануванні списку задач, що необхідно вирішити, та їх відповідній класифікації за певними критеріями. В даному випадку адаптивність є важливим чинником конкурентоспроможності людини, яка планує графік своєї діяльності. Важливу роль при цьому відіграють інформаційні технології, при використанні яких з'являється можливість автоматизувати відповідні процеси прийняття рішень при розв'язуванні задач тайм-менеджменту.

Проблема управління часом є актуальною повсякчас. Питанням розроблення та впровадження методів і технологій тайм-менеджменту в практику діяльності організацій і підприємств присвячені праці таких фахівців як С. Кові, К. Бішоф, Р. Кійосакі, А. Гаст, П. Друкер, Л. Зайверт, Д. Коулі, К. Меллер, Т. Пітерс, Ф. Тейлор, Й. Кноблаух [9].

Також можна виділити публікації останніх років, які присвячені проблемам побудови системного тайм-менеджменту від таких авторів як К. Годефрой [10], Г. Кемпбелл [11], Р. Дейвіс [12], С. Гоупі [13].

Українськими науковцями проблеми тайм-менеджменту також активно досліджуються. Зокрема, Кендюхов О.В. і Ягельська К.Ю. [14] дослідили економічний зміст часу і роль часового фактора у розвитку економічної системи. Євтушенко Г.І. та Дерев'янка В.М. [15] дослідили основні причини втрат часу і

надали пропозиції щодо підвищення ефективності застосування тайм-менеджменту. Петрушенко М. М. і Бондар Т. В. [16] запропонували авторський підхід до впровадження корпоративної системи управління часом. Харук К. Б., Скриньковський Р. М., Крукевич Н. М. [17] дослідили проблеми становлення поняття «тайм-менеджмент» і запропонували інструментарій діагностики тайм-менеджменту на засадах бізнес-індикаторів «ефективність» та «продуктивність». Писаревська Г. І. [18] обґрунтувала методи інвентаризації часу. Н. В. Ізюмцева та Недождій В.В. [19] розглянули етапи побудови системи тайм-менеджменту на підприємстві, а також обґрунтували необхідність здійснення моніторингу робочого часу. Макаренко С. М., Олійник Н. М. і Лущик К. І. у роботі [20] надали рекомендації щодо вдосконалення управління часом та визначення оптимального навантаження для працівників.

На думку Стівена Кові, тайм-менеджмент у вузькому сенсі – це організація особистого часу кожної людини. Він актуальний у тих випадках, коли у працівників існує свобода вибору, виявляється творча ініціатива, що, в свою чергу сприяє підвищенню продуктивності і зниженню рівня стресу, викликаного непередбаченими ситуаціями та поспіхом [21].

В тайм-менеджменті виділяють наступні процеси [22]: аналіз; моделювання стратегій з врахуванням проведеного аналізу; постановка мети або визначення ключового напрямку розвитку; визначення та формулювання мети (цілей); планування та розстановка пріоритетів; розробка плану досягнення поставлених цілей і виділення пріоритетних завдань для виконання; реалізація; контроль досягнення мети, підведення підсумків за результатами.

Базова ідея управління часом полягає в усвідомленні його цінності, тому передбачає дотримання таких принципів як [23]: планування часу; боротьба з пожирачами часу; розстановка пріоритетів; правило Парето; від складного до простого; не робити багато справ одночасно; планування робочого дня з обіду та відпочинку; дотримання чистоти на робочому місці; розбиття складних завдань на прості; розвиток особистої вмотивованості.

Говорячи про постановку цілей, обов'язково треба пам'ятати про те, що мета повинна відповідати критерію SMART [24]: Specific – бути конкретною; Measurable – вимірюваною; Attainable – досяжною; Relevant – доцільною; Time-bound – обмеженою в часі.

Серед популярних методів вирішення задачі тайм-менеджменту можна виокремити наступні: метод «Pomodoro» [25], метод «матриця Ейзенхауера» [26], метод «Знайдений час» [27], метод «Бридких жаб» [27], метод «Формула 10-3-2-1-0» [28].

4.3.1 Постановка задачі тайм-менеджменту

Нехай задачі тайм-менеджменту представлено множиною альтернатив $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$. Ці задачі потрібно розподілити на m класів C_1, C_2, \dots, C_m за допомогою множини критеріїв $K = \{k_1, k_2, \dots, k_m\}$. Згідно з методом «матриця Ейзенхауера», K – множина ступенів важливості задач [3, 26], кількість яких у класичному методі дорівнює $m = 4$, при цьому $n \geq 4$. Відповідно, особа, яка приймає рішення (ОПР), використовує для оцінювання задач такі критерії: k_1 – важливі-термінові задачі (задачі, що вимагають негайного вирішення), k_2 – важливі-нетермінові задачі (задачі, виконання яких треба призначити на пізніший строк), k_3 – неважливі-термінові задачі (задачі, які варто делегувати іншим), k_4 – неважливі-нетермінові задачі (задачі, які потрібно відкласти або взагалі видалити).

Якщо кількість задач в множині A більше 4, то для визначення пріоритетності цих задач доцільно застосовувати метод аналізу ієрархій [29], при цьому зазначені критерії мають однакову вагу в оцінюванні задач.

Для розв'язування цієї задачі можуть залучатись експерти з управління проектами, які здійснюють порівняння і оцінювання альтернатив у відповідності до критеріїв, використовуючи шкалу Сааті [29].

4.3.2 Комбінований метод розв'язання задачі тайм-менеджменту

Розглянемо метод розв'язування задачі класифікації для задач тайм-менеджменту, що використовує МАІ за заданими критеріями методу Ейзенхауера для визначення пріоритетів задач кожного класу.

Поєднання методу аналізу ієрархій та матриці Ейзенхауера зустрічається в наукових працях з точки зору виділення допоміжних матриць (sub-quadrants) для основної матриці Ейзенхауера за допомогою МАІ з подальшими обрахунками [30]. При дослідженні проаналізовано наукову працю з поєднання МАІ та SAW для використання в системі підтримки прийняття рішень, яка базується на матриці Ейзенхауера для вирішення проблеми накопичення завдань, але при цьому використовуються власні критерії оцінювання задач [31]. Також проведено аналіз роботи з використанням BOCR до МАІ та матриці Ейзенхауера [32].

В дисертаційному дослідженні запропоновано спрощений, але не менш ефективний підхід без виділення допоміжних матриць та суб-критеріїв ієрархії. Натомість, запропоновано метод класифікації вхідних задач на чотири класи матриці Ейзенхауера.

У випадку, коли задачу прийняття рішень можна подати за допомогою ієрархічної композиції та застосувати рейтингування альтернативних рішень, доцільно використовувати *метод аналізу ієрархій* (МАІ) – математичний інструмент системного підходу до вирішення складних проблем прийняття рішень. У його основі поряд з математикою закладені і психологічні аспекти. МАІ дозволяє зрозумілим і раціональним чином структурувати складну проблему прийняття рішень у вигляді ієрархії, порівняти і виконати кількісну оцінку альтернативних варіантів рішення [29].

Отже, метод аналізу ієрархії є систематизованою математичною процедурою для ієрархічного подання елементів, які визначають сутність певної проблеми прийняття рішень [29]. Метод полягає у декомпозиції проблеми на більш прості складові частини та подальшій обробці послідовності суджень суб'єкту прийняття рішень (СПР), що подаються у вигляді попарних порівнянь.

Задача класифікації – це формалізована задача, яка містить множину об'єктів (ситуацій) і які потрібно розподілити певним чином на класи, що, в класичному випадку, між собою не перетинаються [33].

Оскільки критерії k_i ($i = 1, 2, 3, 4$) є рівнозначними (матриця парних порівнянь є одиничною), то їх порівняння за МАІ між собою не проводиться. Тому спочатку проводиться порівняння альтернатив з множини A за критерієм k_1 – «важливі-термінові задачі» та їх аналіз на включення до класу задач C_1 за такою процедурою.

Нехай Q – величина ваги з інтервалу $(0; 1)$, що визначає включення альтернативи a_j до відповідного класу задач C_i за критерієм k_i ($i = 1, 2, 3, 4$), тобто, якщо у векторі пріоритетів:

$$W^{(i)} = (w_j^{(i)})_{j=\overline{1,n}},$$

одержаному за МАІ при порівнянні альтернатив [29], відповідна величина $w_j^{(i)} > Q$, то альтернатива a_j потрапляє до класу задач C_i з пріоритетом $w_j^{(i)}$ й вилучається з подальшого аналізу за іншими критеріями; у протилежному випадку альтернатива a_j залишається у множині альтернатив (задач) для подальшого порівняння за наступним критерієм k_{i+1} ($i = 1, 2, 3$). За замовчуванням, параметр Q дорівнює 0.25, оскільки маємо 4 рівнозначних критерії ($Q = 1/4 = 0.25$), але значення цього параметру можна змінити на проміжку $[0.25; 1)$, щоб підняти нижній поріг включення альтернатив до певного класу задач C_i (відповідного квадрата матриці Ейзенхауера) ($i = 1, 2, 3, 4$).

За допомогою обрахованих ваг виокремлюються пріоритетні задачі для виконання в кожному квадраті матриці Ейзенхауера, що, в свою чергу, дає розуміння важливості кожної задачі у межах відповідного класу.

Формально за допомогою описаної процедури відбувається розбиття множини альтернатив $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ на класи задач виду:

$$C_i = \{a_1^{(i)}, a_2^{(i)}, \dots, a_{s_i}^{(i)}\}, i = 1, \dots, 4,$$

так, що

$$A = \bigcup_{i=1}^4 C_i,$$

$$C_i \cap C_j = \emptyset, i \neq j, i, j = 1, \dots, 4,$$

$$\text{де } a_j^{(i)} \in A, w(a_j^{(i)}) \geq Q, j = 1, \dots, s_i, \sum_{i=1}^4 s_i = n, i = 1, \dots, 4,$$

$w(a_j^{(i)})$ – значення пріоритету альтернативи $a_j^{(i)}$ у векторі пріоритетів $W^{(i)}$ матриці парних порівнянь альтернатив за критерієм $k_i, i = 1, \dots, 4$.

Вищеописана процедура дозволяє з більшою точністю класифікувати задачі до матриці Ейзенхауера, а також упорядкувати їх за пріоритетами, що полегшить роботу ОПР при розподілі задач тайм-менеджменту.

Розглянемо детальніше основні етапи запропонованого комбінованого методу розв'язування задач тайм-менеджменту.

Етап 0. Задати $Q = 0.25, C_i = \emptyset, i = \overline{1,4}$. Дане значення можна змінити на проміжку $[0.25; 1)$, щоб підняти нижній поріг включення альтернатив до певного класу задач C_i .

Етап 1. Здійснити порівняння альтернатив (задач) з множини A за критерієм k_1 – «важливі-термінові задачі» за методом аналізу ієрархій та провести їх аналіз на включення до класу задач C_1 за такою процедурою.

Крок 1. Заповнити квадратну матрицю парних порівнянь E в термінах домінування однієї альтернативи (задачі) над іншими за шкалою Сааті, тобто домінування виражаються в цілих числах за дев'ятибальною шкалою або у числах обернених до них. Заповнення квадратної матриці попарних порівнянь E здійснюється за таким *правилом*.

Якщо альтернатива a_i домінує над альтернативою a_j , де $i \neq j$, то комірка матриці, що відповідає рядку a_i і стовпчику a_j заповнюється цілим числом a_{ij} , а комірка, що відповідає рядку a_j і стовпчику a_i , заповнюється оберненим до нього числом $1/a_{ij}$.

Якщо ж навпаки альтернатива a_j домінує над альтернативою a_i , то ціле число a_{ji} ставиться в комірку, що відповідає рядку a_j і стовпчику a_i , а дріб $1/a_{ji}$ проставляється в комірку, що відповідає рядку a_i і стовпчику a_j .

Якщо альтернативи a_i і a_j рівноцінні, то в симетричних комірках матриці ставляться 1.

Для отримання матриці попарних порівнянь ОПР або експерт виносить $n(n-1)/2$ оцінок (тут n – порядок матриці попарних порівнянь).

При цьому, буде одержана матриця M :

$$M = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \cdots & 1 \end{pmatrix}$$

Після цього потрібно покласти $M_{k1} = M$.

Крок 2. Ранжування альтернатив (задач) за пріоритетом, що аналізуються з використанням матриці попарних порівнянь, здійснюється на підставі аналізу головних власних векторів матриці попарних порівнянь. Головний власний вектор забезпечує упорядкування альтернатив за пріоритетами, а власне значення є *мірою узгодженості (однорідності)* суджень експерта. Обчислення головного власного вектору W додатної квадратної матриці E на основі розв'язання матричного рівняння:

$$MW = \lambda_{max} W,$$

де $W = \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \cdots \\ w_n \end{pmatrix}$ – головний власний вектор матриці M , що відповідає λ_{max} –

максимальному власному значенню матриці M серед її власних значень, тобто чисел λ , що є коренями характеристичного рівняння виду: $\det(M - E\lambda) = 0$, де E – одинична матриця.

Якщо власний вектор W нормований (сума його елементів дорівнює 1), то він є вектором пріоритетів для матриці M .

Якщо власний вектор W ненормований, то потрібно його пронормувати. Для цього необхідно знайти суму всіх його елементів і утворити новий вектор W' , елементи якого є відношенням елементів вектору W на знайдену суму:

$$W' = (w'_i)_{i=1,n}, \text{ де } w'_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}.$$

Нехай за описаною процедурою парних порівнянь за критерієм k_1 знайдено нормований вектор пріоритетів альтернатив (задач):

$$W^{(1)} = (w_i^{(1)})_{i=\overline{1,n}}.$$

Крок 3. За методом аналізу ієрархій для матриці парних порівнянь M обраховується значення узгодженості оцінки експерта на основі показника ВО – відношення однорідності (узгодженості) матриці парних порівнянь M , який вказує на те, наскільки узгоджені судження експерта про об'єкти порівняння:

$$CR = CI/RI,$$

де:

– $CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$ – індекс однорідності (узгодженості) матриці парних порівнянь, n – кількість елементів, що порівнюються між собою; λ_{max} – максимальне власне значення матриці парних порівнянь M ;

– RI – середнє значення (математичне сподівання) індексу однорідності випадковим чином складеної матриці попарних порівнянь за шкалою від 1 до 9 обернено-симетричної матриці з відповідними оберненими величинами елементів, що базується на експериментальних даних (табл. 2.6).

Значення CR вважається допустимим, якщо воно не перевищує 0.1. Тому, якщо $CR \leq 0.1$, то матриця парних порівнянь M вважається узгодженою, і відбувається перехід на крок 4. Інакше матриця парних порівнянь M вважається неузгодженою і експерту потрібно повернутися до кроку 1 й повторити процедуру порівняння.

Крок 4. Для кожної альтернативи a_i , $i = \overline{1,n}$, аналізуються значення її пріоритету $w_i^{(1)}$. Якщо відповідна величина $w_i^{(1)} \geq Q$, то альтернатива a_i потрапляє до класу задач C_1 з пріоритетом $w_i^{(1)}$, тобто $C_1 = C_1 \cup \{a_i\}$ і вилучається з подальшого аналізу за іншими критеріями: $A = A \setminus \{a_i\}$. У протилежному випадку альтернатива a_i залишається у множині альтернатив (задач) A для подальшого порівняння за наступним критерієм k_2 .

У результаті цієї процедури буде одержано такі об'єкти:

– M_{k1} – узгоджена матриця парних порівнянь альтернатив з множини A ;

- $W^{(1)} = (w_i^{(1)})_{i=\overline{1,n}}$ – нормований вектор пріоритетів альтернатив (задач) за критерієм k_1 ;
- $C_1 = \{a_1^{(1)}, a_2^{(1)}, \dots, a_{s_1}^{(1)}\}$ – клас задач, що відповідають критерію k_1 , тобто для яких $w_i^{(1)} \geq Q, i = \overline{1, s_1}$;
- $A_1 = A \setminus C_1$ – множина альтернатив (задач), що не увійшли до класу задач C_1 .

Етап 2. Провести порівняння альтернатив з множини A_1 за критерієм k_2 – «важливі-нетермінові задачі» та їх аналіз на включення до класу задач C_2 за процедурою, аналогічною, що описана на етапі 1. В результаті цього будуть одержані такі об'єкти:

- M_{k2} – узгоджена матриця парних порівнянь альтернатив з множини $A_1 = A \setminus C_1$;
- $W^{(2)} = (w_i^{(2)})_{i=\overline{1,n_1}}$ – нормований вектор пріоритетів альтернатив (задач) за критерієм k_2 , де n_1 – кількість альтернатив (задач), що залишилися в множині A_1 ;
- $C_2 = \{a_1^{(2)}, a_2^{(2)}, \dots, a_{s_2}^{(2)}\}$ – клас задач, що відповідають критерію k_2 , тобто для яких $w_i^{(2)} > Q, i = \overline{1, s_2}$;
- $A_2 = A_1 \setminus C_2$ – множина альтернатив (задач), що не увійшли до класу задач C_1 і C_2 .

Етап 3. Провести порівняння альтернатив з множини A_2 за критерієм k_3 – «неважливі-термінові задачі» та їх аналіз на включення до класу задач C_3 за процедурою, аналогічною той, що описана на етапі 1. В результаті цього будуть одержані такі об'єкти:

- M_{k3} – узгоджена матриця парних порівнянь альтернатив з множини A_2 ;
- $W^{(3)} = (w_i^{(3)})_{i=\overline{1,n_2}}$ – нормований вектор пріоритетів альтернатив (задач) за критерієм k_3 , де n_2 – кількість альтернатив (задач), що залишилися в множині A_2 ;

- $C_3 = \{a_1^{(3)}, a_2^{(3)}, \dots, a_{s_3}^{(3)}\}$ – клас задач, що відповідають критерію k_3 , тобто для яких $w_i^{(3)} > Q, i = \overline{1, s_3}$;
- $A_3 = A_2 \setminus C_3$ – множина альтернатив (задач), що не увійшли до класу задач C_1, C_2 і C_3 .

Етап 4. Якщо в множині A_3 залишилась лише одна задача, то вона автоматично потрапляє в категорію задач k_4 – неважливі-нетермінові задачі, тобто до класу задач C_4 . Якщо у множині A_3 залишилось більше однієї задачі, то потрібно провести порівняння альтернатив з множини A_3 за критерієм k_4 – «неважливі-нетермінові задачі» за кроками 1, 2 і 3 та їх всі включити до класу задач C_4 . В результаті цього будуть одержані такі об'єкти:

- якщо кількість задач у множині A_3 більше однієї: M_{k_4} – узгоджена матриця парних порівнянь альтернатив з множини A_3 , $W^{(4)} = (w_i^{(4)})_{i=\overline{1, n_3}}$ – нормований вектор пріоритетів альтернатив (задач) за критерієм k_4 , де n_3 – кількість альтернатив (задач), що залишилися в множині A_3 ;
- $C_4 = \{a_1^{(4)}, a_2^{(4)}, \dots, a_{s_4}^{(4)}\}$ – клас задач, що відповідають критерію k_4 .

Результатом наведеної процедури буде розбиття множини альтернатив (задач) A на класи альтернатив (задач) C_1, C_2, C_3, C_4 , що відповідають зазначеним критеріям k_1, k_2, k_3, k_4 , при цьому для кожної задачі $a_j^{(i)}$ з кожного класу буде відоме значення пріоритету $w_j^{(i)} \geq Q$.

Даний алгоритм можна віднести до задачі класифікації – це формалізована задача, яка містить множину об'єктів (ситуацій) і які потрібно розподілити певним чином на класи, що, в класичному випадку, між собою не перетинаються [31]. Програмна реалізація цього методу у межах створення системи підтримки прийняття рішень описана в розділі 5.

4.4 Задача і методи прийняття рішень в умовах нечіткої інформації

4.4.1 Постановка задачі прийняття рішень в умовах нечіткої інформації

Нечітка інформація – це інформація, яка не є однозначно визначеною або має розмиті межі. Така інформація характеризується невизначеністю і нечіткістю в оцінці параметрів, що ускладнює традиційні підходи до прийняття рішень, що базуються на точних числових значеннях [34-37].

Нехай X – універсальна множина альтернатив, тобто сукупність варіантів, серед яких ОПР здійснює вибір. *Нечіткою метою* в множині X будемо називати деяку її нечітку підмножину. Позначимо цю підмножину G . Нечітка мета описується функцією належності $\mu_G: X \rightarrow [0; 1]$. Чим вищий ступінь належності альтернативи x до нечіткої множини мети μ_G , тобто чим більше значення $\mu_G(x)$, тим вищий буде ступінь досягнення цієї мети, якщо вибрати альтернативу x за розв’язок. Нечіткі обмеження, або множину допустимих альтернатив, також описують нечіткими підмножинами множини X . Позначимо їх як C_1, C_2, \dots, C_m . Будемо вважати, що нам відомі функції належності цих нечітких множин [38].

Розв’язати задачу означає досягнути мети й задовольнити обмеження, причому в такій постановці слід говорити не просто про досягнення мети, а про її реалізацію тією чи іншою мірою. Необхідно також враховувати й ступінь виконання обмежень.

Основним у підході Беллмана–Заде [34, 35] до розв’язування цієї задачі є те, що мету прийняття рішень і множину альтернатив розглядають як рівноважні нечіткі підмножини деякої універсальної множини альтернатив. Це дозволяє подати розв’язок задачі у відносно простому вигляді. Зокрема, у підході Беллмана–Заде вимоги враховуються описаним нижче способом.

Нехай, наприклад, деяка альтернатива x забезпечує досягнення мети (інакше – відповідає меті) зі ступенем $\mu_G(x)$ і задовольняє обмеження (або є допустимою) зі ступенем $\mu_C(x)$. За таких умов *нечітким розв’язком* D задачі досягнення нечіткої мети називається перетин нечітких множин мети й обмежень,

тобто $D = G \cap C$. Отже, розв'язок задачі нечітко визначеної мети також являє собою деяку нечітку підмножину універсальної множини альтернатив X . Якщо перетин множин визначати за правилом перетину [38], то функція належності розв'язку μ_D буде мати такий вигляд [38]:

$$\mu_D(x) = \min \{\mu_G(x), \mu_C(x)\}.$$

Розв'язок задачі можна інтерпретувати як певну інструкцію. При такому представленні залишається невизначеність, яку ж альтернативу обрати, іншими словами потрібно зняти цю невизначеність. Для цього існують різні способи. Найбільш розповсюдженим з них, запропонований Л. Заде, полягає у виборі альтернативи x^* , що має максимальну ступінь належності у нечіткому розв'язку, тобто альтернативу що визначається умовою:

$$\mu_D(x^*) = \max_{x \in X} \mu_D(x) = \max_{x \in X} \min \{\mu_G(x), \mu_C(x)\}.$$

Такі альтернативи називаються *максимізуючими*.

За наявності в задачі кількох нечітких цілей G_1, G_2, \dots, G_n і кількох нечітких обмежень C_1, C_2, \dots, C_m нечіткий розв'язок D описується такою функцією належності:

$$\mu_D(x) = \min \{\mu_{G_1}(x), \dots, \mu_{G_n}(x), \mu_{C_1}(x), \dots, \mu_{C_m}(x)\}.$$

При цьому максимізуюча альтернатива x^* визначається умовою:

$$\mu_D(x^*) = \max_{x \in X} \mu_D(x).$$

Якщо різні цілі і обмеження розрізняються за ступенем важливості і задані відповідні коефіцієнти відносної важливості цілей $\lambda_i \in (0; 1]$ ($i = 1, 2, \dots, n$) і обмежень $v_j \in (0; 1]$ ($j = 1, 2, \dots, m$), то $\mu_D(x)$ задається виразом:

$$\mu_D(x) = \min \{\lambda_1 \mu_{G_1}(x), \dots, \lambda_n \mu_{G_n}(x), v_1 \mu_{C_1}(x), \dots, v_m \mu_{C_m}(x)\},$$

або

$$\mu_D(x) = \min \{\mu_{G_1}^{\lambda_1}(x), \dots, \mu_{G_n}^{\lambda_n}(x), \mu_{C_1}^{v_1}(x), \dots, \mu_{C_m}^{v_m}(x)\}.$$

При цьому максимізуючи альтернатива x^* визначається умовою:

$$\mu_D(x^*) = \max_{x \in X} \mu_D(x).$$

Зручним та ефективним інструментом для відображення експертних оцінок, особливо у випадках, коли точна кількісна інформація недоступна або невизначена, є лінгвістичні оцінки. Вони дозволяють експертам висловлювати свої судження в зручній для сприйняття формі, яка часто базується на природній мові.

Чень С.Т. у роботах [39] та [40] розширив метод TOPSIS за рахунок процедури, що використовує лінгвістичні оцінки у вигляді трикутних та трапецієвидних нечітких чисел (НЧ). Розглянемо деякі аспекти цього підходу.

У загальному вигляді параметрична форма трикутного нечіткого числа являє собою трійку (a, b, c) , де a – лівий, b – середній, c – правий параметри цього нечіткого числа, а параметрична форма трапецієвидного нечіткого числа являє собою четвірку (a, b, c, d) , де a – лівий, b – лівий середній, c – правий середній, d – правий параметри цього нечіткого числа [34, 35].

Приклади лінгвістичних оцінок та їх представлення у вигляді трикутних і трапецієвидних нечітких чисел наведено в табл. 4.1, а графічне представлення цих чисел наведено на рис. 4.1.

Таблиця 4.1 – Приклади лінгвістичних оцінок для нечітких чисел [розроблено на основі [34, 35, 39, 40]]

Лінгвістичні терми	Нечіткі трикутні числа	Нечіткі трапецієвидні числа
Дуже низький (VL)	(1, 1, 3)	(1, 1, 2, 3)
Низький (L)	(1, 3, 5)	(2, 3, 4, 5)
Середній (M)	(3, 5, 7)	(4, 5, 6, 7)
Високий (H)	(5, 7, 9)	(6, 7, 8, 9)
Дуже високий (VH)	(7, 9, 9)	(8, 9, 10, 10)

Лінгвістичні оцінки являють собою лінгвістичні терми, яким відповідають певні нечіткі числа, як правило у трикутній, або трапецієвидній параметричній формі.

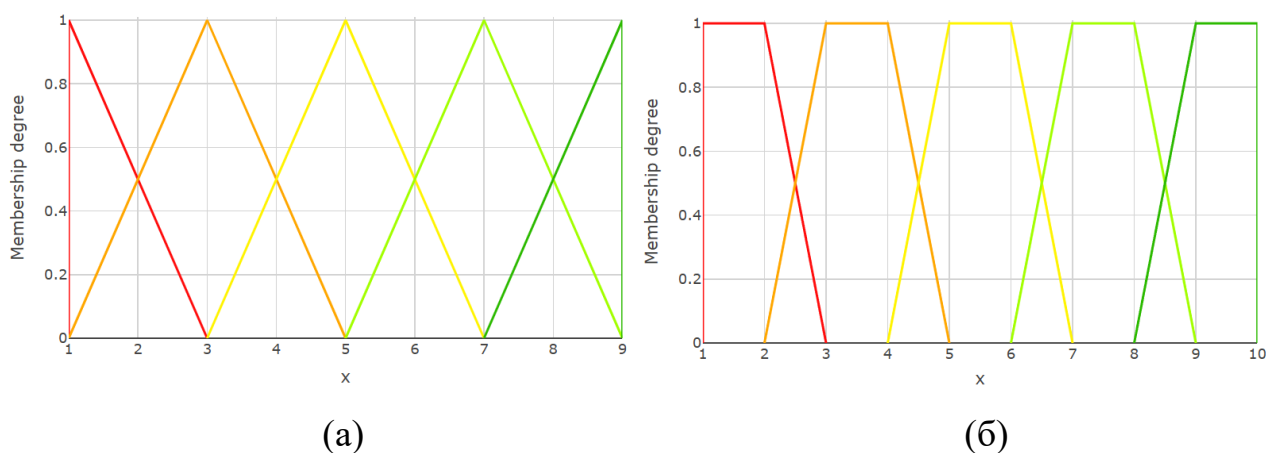


Рисунок 4.1 – Приклади нечітких трикутних чисел (а) та трапецієвидних чисел (б)
[розроблено на основі [34, 35, 39, 40]]

Для прийняття рішень в умовах нечіткості використовуються, зокрема: теорія нечітких множин [34]; нечіткі нейронні мережі [41, 42]; нечіткі байєсівські мережі [43]; нечіткі методи кластеризації та класифікації [44]; застосування нечітких множин для багатокритеріальних методів прийняття рішень [45].

Варто відзначити українських науковців, дослідження яких спрямовані на застосування нечіткої логіки, серед яких Зайченко Ю. П. [46], Згуровський М. З. [47], Снитюк В. Є. [48], Гнатієнко Г. М. [49], Матвійчук А. В. [50], Федоров Є. Є [51].

4.4.2 Модифікований метод Fuzzy TOPSIS розв'язування задачі багатокритеріального прийняття рішень

Одним з найбільш відомих методів наближеного розв'язку задачі багатокритеріального прийняття рішень виду (2.18) є метод упорядкування за подібністю до ідеального розв'язку (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS), розроблений Ч.Л. Хвангом і К. Юном [52] з подальшими розробками К. Юном [53] та Ч.Л. Хвангом, Ю. Лаєм і Т. Лю [54]. Цей метод базується на концепції, що обраний варіант альтернативи повинен мати найменшу відстань до позитивного ідеального розв'язку (PIS) (розв'язок, який максимізує критерії вигоди і мінімізує критерії витрат) та найбільшу відстань до негативного ідеального розв'язку (NIS) (розв'язок, який мінімізує критерії вигоди і максимізує критерії витрат) [53].

При постановці задачі MCDM особи, які приймають рішення (ОПР), а також консультанти та експерти, які їм допомагають при її вирішенні, аналізуючи ситуацію та формуючи рекомендації для прийняття рішень, зазвичай, оперують природною мовою, в якій слова можуть мати неоднозначне або нечітко визначене значення. Тому виникає потреба застосовувати апарат нечітких множин, коли спочатку потрібно фазифікувати вхідну інформацію, наприклад у вигляді нечітких чисел, та описати суб'єктивні судження про об'єкт дослідження, наприклад у вигляді лінгвістичних змінних, а потім на основі правил нечіткого логічного виведення дефазифікувати одержані результати у форму, зрозумілу особі, яка приймає рішення. На практиці для фазифікації вхідних даних, як правило, використовують нечіткі числа (НЧ), зокрема трикутні НЧ та трапецієвидні НЧ [55].

Варто зазначити, що концепція лінгвістичної змінної, запропонована Л. Заде [56], дозволяє здійснювати обчислення зі словами замість чисел, і саме тому лінгвістичні терміни, визначені за допомогою нечітких множин, активно використовуються в задачах прийняття рішень для моделювання процесів в умовах невизначеної інформації. У цій галузі можна виділити монографію Ченя С.Т. [57] та оглядові статті, присвячені нечітким методам багатокритеріального прийняття рішень (MCDM) [58-61].

У науковій спільноті активно ведуться дослідження та розробка нових модифікацій методу FTOPSIS. Зокрема, у роботі Kustiyahningsih *et al.* [62] здійснено аналіз застосування різних типів нечіткої логіки у методі FTOPSIS, однак виключно з використанням евклідової метрики для визначення відстані між ідеальним та антиідеальним рішенням.

У дослідженні Rane *et al.* [63] проведено порівняльний аналіз ефективності методів Fuzzy AHP та FTOPSIS, де також використано класичну евклідову метрику. Результати показали, що обидва методи є ефективними інструментами для багатокритеріального прийняття рішень в умовах невизначеності, проте FTOPSIS продемонстрував дещо вищу чутливість до змін у вагових коефіцієнтах критеріїв порівняно з Fuzzy AHP.

У роботі Yin *et al.* [64] застосовано класичну евклідову метрику для вимірювання відстані між альтернативами в контексті багатокритеріального аналізу за методом TOPSIS. Автори звернули увагу на обмеження класичної евклідової відстані, яка може не завжди коректно відображати різницю між нечіткими або неструктурованими даними, що часто виникає в практичних задачах. У зв'язку з цим ними було запропоновано модифікацію евклідової відстані, що отримала назву відносної евклідової відстані.

У роботі Han *et al.* [65] було продемонстровано практичне застосування методу FTOPSIS із використанням евклідової відстані для вирішення багатокритеріальних задач прийняття рішень. Це дослідження продемонструвало практичне використання FTOPSIS, зокрема в контексті використання стандартних метрик в реальних задачах прийняття рішень.

У дослідженні Talukdar *et al.* [66] було розглянуто шість різних метрик відстані у рамках класичного методу TOPSIS, що дозволило провести порівняльний аналіз на основі прикладів. Проте, зазначене дослідження потребує розширення у напрямі формалізації загальної моделі застосування різних метрик для методу FTOPSIS.

У свою чергу, в дослідженні Shyur *et al.* [67] проаналізовано вплив вибору метрики на результати ранжування альтернатив у класичному методі TOPSIS. Автори акцентують увагу на важливості коректного вибору метрики, оскільки різні метрики можуть значно змінювати результати ранжування, впливаючи на прийняття рішень у багатокритеріальних задачах.

У дослідженні Arman *et al.* [68] акцентовано увагу на неправильному застосуванні евклідової метрики для вимірювання різниці між нечіткими числами. Дослідники підкреслюють, що, хоча евклідова метрика використовується для вимірювання відстані між точками в багатовимірних просторах, її застосування до нечітких чисел є концептуально неправильним. Автори дійшли до висновку що використання евклідової метрики в контексті нечітких чисел може призвести до неточних результатів, оскільки така метрика не відображає їх сутнісну різницю.

Узагальнюючи результати аналізу наукових джерел, можна стверджувати, що переважна більшість існуючих досліджень орієнтована на використання стандартної евклідової метрики в методі TOPSIS та його нечіткій модифікації FTOPSIS. Відтак, одним із завдань даного дослідження є аналіз впливу вибору метрики на результати методу FTOPSIS.

Важливим аспектом використання методів багатокритеріального прийняття рішень на основі апарата нечітких множин є залучення експертів до оцінювання альтернатив за різними критеріями. Це призводить до того, що одержані нечіткі оцінки, особливо при одноосібній експертизі, мають суб'єктивний характер. У цій ситуації для підвищення точності оцінювання альтернатив доцільно використовувати експертизу із залученням кількох експертів. У свою чергу, це призводить до необхідності застосовувати методи агрегування думок експертів. Тому виникає потреба у розробці інформаційних технологій, що забезпечують проведення групової експертизи з використанням нечітких методів багатокритеріального прийняття рішень та реалізують процедуру агрегування оцінок експертів.

Отже, виникає актуальна проблема, яка полягає у розробці модифікованого методу FTOPSIS з використанням відповідних адаптованих метрик, а також створенні інформаційної технології, що їх реалізує, і враховує результати групової експертизи для більш точної та ефективної оцінки й вибору кращої альтернативи з багатьох можливих за кількома критеріями корисності.

Аналіз показує, що FTOPSIS є більш ефективним методом порівняно з ФАНР в ряді ситуацій через кілька ключових аспектів:

1. FTOPSIS зручний для практичного застосування, оскільки він зосереджений на знаходженні найбільш ідеального рішення, яке максимально наближається до ідеального (найкращого) варіанту та максимально віддаляється від найгіршого варіанту. Це робить метод легким для розуміння та застосування, особливо коли потрібно просто і швидко оцінити альтернативи за декількома критеріями. ФАНР, в свою чергу, часто вимагає більше етапів обчислень та

глибшого аналізу, зокрема ієрархії критеріїв і підкритеріїв, що може бути більш складним у випадку великої кількості критеріїв.

2. FTOPSIS добре працює з великими кількостями альтернатив і критеріїв. Це дозволяє швидко здійснити оцінку в рамках великих наборів даних. FTOPSIS не потребує побудови складної ієрархії критеріїв, що спрощує процес прийняття рішення, особливо у випадках, коли складні взаємозв'язки між критеріями не є очевидними. ФАНР може стати складним при великих кількостях критеріїв та/або альтернатив, оскільки потребує побудови ієрархічної структури і порівняння кожної пари критеріїв за головним критерієм, а також порівняння кожної пари альтернатив за кожним критерієм, що швидко збільшує обсяг розрахунків. ФАНР вимагає ретельної побудови структури ієрархії об'єкту дослідження та важливих порівнянь між кожним рівнем ієрархії, що може бути складним і займати більше часу.

Загалом, FTOPSIS є ефективним у тих випадках, коли потрібно швидко та ефективно оцінити альтернативи за великою кількістю критеріїв.

Більшість сучасних підходів до оцінки відстаней у методах TOPSIS і FTOPSIS [61-68], як правило, спираються на евклідову метрику. Однак, у контексті складних та багатовимірних даних ця метрика не завжди адекватно відображає реальні відмінності між альтернативами. Це підкреслює необхідність дослідження та впровадження альтернативних метрик, таких як мангеттенська метрика, метрики Чебишова, Мінковського, Геміннга. Однак застосування альтернативних метрик у контексті нечітких множин потребує додаткової адаптації. Більшість класичних метрик були розроблені для роботи з точними числовими даними і не враховують особливості представлення нечітких даних, наприклад, у вигляді трикутних або трапецієвидних нечітких чисел. Це ускладнює безпосереднє використання стандартних формул для обчислення відстаней між оцінками альтернатив. Відтак необхідно розробити нові метрики або модифікувати існуючі метрики так, щоб вони могли коректно обробляти нечіткі дані, забезпечуючи точність і надійність оцінювання.

Отже, виникає актуальна проблема, яка полягає у розробці модифікованого методу FTOPSIS з використанням відповідних адаптованих метрик, а також створенні інформаційної технології, що їх реалізує, а також враховує результати групової експертизи для більш точної та ефективної оцінки й вибору кращої альтернативи з багатьох можливих за кількома критеріями корисності. Саме вирішенню цієї проблеми і присвячена дана стаття.

У якості практичного застосування розробленої інформаційної технології у дослідженні розв'язується задача вибору найкращого з популярних стандартів управління ризиками в ІТ-проектах в розділі 4.

Для обчислення відстані від кожної альтернативи до нечіткого позитивного ідеального розв'язку (FPIS) та нечіткого негативного ідеального розв'язку (FNIS) у FTOPSIS Чень С.Т. [39] запропонував метод вершин для обчислення відстані між двома нечіткими числами, суть якого полягає у наступному.

Нехай $\tilde{x} = (a_1, a_2, \dots, a_n)$, $\tilde{y} = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ – нечіткі числа, задані своїми параметрами, де $n = 3$ для трикутних НЧ і $n = 4$ для трапецієвидних НЧ. Тоді узагальнена адаптована формула обчислення евклідової відстані між трикутними та трапецієвидними НЧ має вигляд:

$$d_E(\tilde{x}, \tilde{y}) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2}. \quad (4.1)$$

Розглянемо особливості обчислення відстаней між трикутними та трапецієвидними НЧ за деякими популярними метриками.

Мангеттенська метрика – це метрика, згідно з якою відстань між двома точками $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ і $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ дорівнює сумі модулів різниць їх координат [69-71]:

$$d_{MH}(x, y) = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|. \quad (4.2)$$

Нехай $\tilde{x} = (a_1, a_2, \dots, a_n)$, $\tilde{y} = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ – нечіткі числа, задані своїми параметрами, де $n = 3$ для трикутних НЧ і $n = 4$ для трапецієвидних НЧ. Тоді узагальнена адаптована формула (4.2) для трикутних та трапецієвидних НЧ має вигляд:

$$d_{MH}(\tilde{x}, \tilde{y}) = \sum_{i=1}^n |a_i - b_i|, \quad (4.3)$$

де $n = 3$ для трикутних НЧ; $n = 4$ для трапецієвидних НЧ.

Метрика Чебишова – це метрика, яка визначає відстань між двома n -вимірними числовими векторами $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ і $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ як максимум модулів різниці їх компонент [69]. Метрика Чебишова часто позначається через l_∞ :

$$l_\infty(\vec{x}, \vec{y}) = \max_{i=1, n} |x_i - y_i|. \quad (4.4)$$

Тоді узагальнена адаптована формула (4.4) для НЧ $\tilde{x} = (a_1, a_2, \dots, a_n)$, $\tilde{y} = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ має вигляд:

$$d_\infty(\tilde{x}, \tilde{y}) = \max_{1 \leq i \leq n} |a_i - b_i|, \quad (4.5)$$

де $n = 3$ для трикутних НЧ; $n = 4$ для трапецієвидних НЧ.

Метрика Мінковського – параметрична метрика, яку можна розглядати як узагальнення евклідової метрики та мангеттеніської метрики. Відстань Мінковського порядку p між двома точками $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ і $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ визначається за формулою:

$$l_p(x, y) = (\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|^p)^{\frac{1}{p}}. \quad (4.6)$$

Метрика Мінковського є узагальненням евклідової метрики при параметрі $p = 2$, коли ж $p = 1$, то одержуємо мангеттенську метрику [69]. Якщо ж p прямує до плюс нескінченності, то відстань за Мінковським наближується до відстані Чебишова:

$$\lim_{p \rightarrow +\infty} (\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|^p)^{1/p} = \max_{i=1, n} |x_i - y_i|. \quad (4.7)$$

Аналогічно, коли p прямує до мінус нескінченності, то отримуємо:

$$\lim_{p \rightarrow -\infty} (\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|^p)^{1/p} = \min_{i=1, n} |x_i - y_i|. \quad (4.8)$$

Узагальнена адаптована формула (4.6) для НЧ $\tilde{x} = (a_1, a_2, \dots, a_n)$, $\tilde{y} = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ має вигляд:

$$d_M(\tilde{x}, \tilde{y}) = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |a_i - b_i|^p \right)^{\frac{1}{p}}, \quad (4.9)$$

де $n = 3$ для трикутних НЧ; $n = 4$ для трапецієвидних НЧ.

Метрика Геммінга – це метрика, яка обраховує кількість позицій, в яких відповідні символи двох слів однакової довжини різні [72]. Відстань Геммінга між двома точками $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ і $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ визначається за формулою:

$$d_H(\tilde{x}, \tilde{y}) = \sum_{i=1}^n |x_i - y_j|, \text{ де } |x_i - y_j| = \begin{cases} 1, & x_i \neq y_j \\ 0, & x_i = y_j \end{cases}. \quad (4.10)$$

Узагальнена адаптована формула (4.10) для НЧ $\tilde{x} = (a_1, a_2, \dots, a_n)$, $\tilde{y} = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ має вигляд:

$$d_H(\tilde{x}, \tilde{y}) = \sum_{i=1}^n |a_i - b_i|, \text{ де } |a_i - b_i| = \begin{cases} 1, & a_i \neq b_i \\ 0, & a_i = b_i \end{cases}, \quad (4.11)$$

при цьому $n = 3$ для трикутних НЧ; $n = 4$ для трапецієвидних НЧ.

Розглянемо основні кроки методу, який є модифікацією методу FTOPSIS [39], [40], [73] для випадку групової експертизи і використовує різні метрики обчислення відстані від кожної альтернативи до FPIS та FNIS з метою визначення найкращої альтернативи.

Припустимо, що є група фахівців з прийняття рішень, яка складається з Кекспертів.

Крок 1. Призначення нечітких оцінок критеріям та альтернативам.

Кожен k -тий експерт групи ($k = \overline{1, K}$) визначає лінгвістичну оцінку ваги кожного критерію C_j ($j = \overline{1, M}$), якій відповідає трикутне нечітке число $\tilde{w}_j^k = (w_{j1}^k, w_{j2}^k, w_{j3}^k)$. Далі k -тий експерт групи визначає лінгвістичну оцінку для кожної альтернативи A_i ($i = \overline{1, N}$) по відношенню до критерію C_j ($j = \overline{1, M}$), якій відповідає трикутне нечітке число $\tilde{x}_{ij}^k = (a_{ij}^k, b_{ij}^k, c_{ij}^k)$.

Якщо лінгвістичним оцінкам k -го експерта групи відповідають нечіткі трапецієвидні числа \tilde{w}_j^k і \tilde{x}_{ij}^k , то вони відповідно мають такий вигляд:

$$\tilde{w}_j^k = (w_{j1}^k, w_{j2}^k, w_{j3}^k, w_{j4}^k), \quad \tilde{x}_{ij}^k = (a_{ij}^k, b_{ij}^k, c_{ij}^k, d_{ij}^k). \quad (4.12)$$

Крок 2. Обчислення агрегованих нечітких ваг для критеріїв та агрегованих нечітких оцінок для альтернатив.

Агрегована нечітка оцінка ваги у трикутній формі $\tilde{w}_j = (w_{j1}, w_{j2}, w_{j3})$ для критерію C_j обчислюється за формулами:

$$w_{j1} = \min_{k=1, \overline{K}} \{w_{j1}^k\}, w_{j2} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K w_{j2}^k, w_{j3} = \max_{k=1, \overline{K}} \{w_{j3}^k\}, j = \overline{1, M}. \quad (4.13)$$

Аналогічно, агрегована трикутна нечітка оцінка $\tilde{x}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$ для альтернативи A_i щодо критерію C_j обчислюється за формулами:

$$a_{ij} = \min_{k=1, \overline{K}} \{a_{ij}^k\}, b_{ij} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K b_{ij}^k, c_{ij} = \max_{k=1, \overline{K}} \{c_{ij}^k\}, i = \overline{1, N}, j = \overline{1, M}. \quad (4.14)$$

Ці формули дозволяють отримати спільну нечітку оцінку, яка враховує мінімальні, середні та максимальні значення від нечітких оцінок усіх експертів групи.

Нехай $\tilde{w}_j^k = (w_{j1}^k, w_{j2}^k, w_{j3}^k, w_{j4}^k)$ – трапецієвидна нечітка оцінка ваги, яку визначив k -тий експерт групи для критерію C_j ($j = \overline{1, M}$). Тоді агреговану нечітку вагу $\tilde{w}_j = (w_{j1}, w_{j2}, w_{j3}, w_{j4})$ для критерію C_j можна обчислити за такими формулами:

$$\begin{aligned} w_{j1} &= \min_{k=1, \overline{K}} \{w_{j1}^k\}, w_{j2} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K w_{j2}^k, \\ w_{j3} &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K w_{j3}^k, w_{j4} = \max_{k=1, \overline{K}} \{w_{j4}^k\}, j = \overline{1, M}. \end{aligned} \quad (4.15)$$

Нехай $\tilde{x}_{ij}^k = (a_{ij}^k, b_{ij}^k, c_{ij}^k, d_{ij}^k)$ – трапецієвидна нечітка оцінка k -го експерта групи з прийняття рішень для альтернативи A_i ($i = \overline{1, N}$) щодо критерію C_j ($j = \overline{1, M}$). Тоді агреговані нечіткі оцінки для трапецієвидних нечітких чисел $\tilde{x}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij})$ визначаються за формулами:

$$\begin{aligned} a_{ij} &= \min_{k=1, \overline{K}} \{a_{ij}^k\}, b_{ij} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K b_{ij}^k, \\ c_{ij} &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K c_{ij}^k, d_{ij} = \max_{k=1, \overline{K}} \{d_{ij}^k\}, i = \overline{1, N}, j = \overline{1, M}. \end{aligned} \quad (4.16)$$

Крок 3. Обчислення нормалізованої нечіткої матриці рішень.

Нормалізована нечітка матриця рішень позначається як $\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]$, в якій для трикутних НЧ:

$$\tilde{r}_{ij} = (r_{ij1}, r_{ij2}, r_{ij3}) = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^+}, \frac{b_{ij}}{c_j^+}, \frac{c_{ij}}{c_j^+} \right), i = \overline{1, N}, j = \overline{1, P}, \quad (4.17)$$

де $c_j^+ = \max_{i=\overline{1, N}} \{c_{ij}\}$ – для критерію вигоди,

i

$$\tilde{r}_{ij} = (r_{ij1}, r_{ij2}, r_{ij3}) = \left(\frac{a_j^-}{c_{ij}}, \frac{a_j^-}{b_{ij}}, \frac{a_j^-}{a_{ij}} \right), i = \overline{1, N}, j = \overline{P+1, M}, \quad (4.18)$$

де $a_j^- = \min_{i=\overline{1, N}} \{a_{ij}\}$ – для критерію витрат.

У нормалізованій нечіткій матриці $\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]$ для трапецієвидних НЧ маємо:

$$\tilde{r}_{ij} = (r_{ij1}, r_{ij2}, r_{ij3}, r_{ij4}) = \left(\frac{a_{ij}}{d_j^+}, \frac{b_{ij}}{d_j^+}, \frac{c_{ij}}{d_j^+}, \frac{d_{ij}}{d_j^+} \right), i = \overline{1, N}, j = \overline{1, P}, \quad (4.19)$$

де $d_j^+ = \max_{i=\overline{1, N}} \{d_{ij}\}$ – для критерію вигоди,

i

$$\tilde{r}_{ij} = (r_{ij1}, r_{ij2}, r_{ij3}, r_{ij4}) = \left(\frac{a_j^-}{d_{ij}}, \frac{a_j^-}{c_{ij}}, \frac{a_j^-}{b_{ij}}, \frac{a_j^-}{a_{ij}} \right), i = \overline{1, N}, j = \overline{P+1, M}, \quad (4.20)$$

де $a_j^- = \min_{i=\overline{1, N}} \{a_{ij}\}$ – для критерію витрат.

Крок 4. Обчислення зваженої нормалізованої нечіткої матриці рішень.

Обчислюється зважена нормалізована нечітка матриця рішень

$$\tilde{V} = (\tilde{v}_{ij}), i = \overline{1, N}, j = \overline{1, M}, \quad (4.21)$$

при цьому для трикутних нечітких оцінок

$$\tilde{v}_{ij} = (v_{ij1}, v_{ij2}, v_{ij3}) = (r_{ij1} \cdot w_{j1}, r_{ij2} \cdot w_{j2}, r_{ij3} \cdot w_{j3}), \quad (4.22)$$

а для трапецієвидних нечітких оцінок

$$\tilde{v}_{ij} = (v_{ij1}, v_{ij2}, v_{ij3}, v_{ij4}) = (r_{ij1} \cdot w_{j1}, r_{ij2} \cdot w_{j2}, r_{ij3} \cdot w_{j3}, r_{ij4} \cdot w_{j4}). \quad (4.23)$$

Крок 5. Обчислення нечіткого позитивного ідеального розв'язку (FPIS) та нечіткого негативного ідеального розв'язку (FNIS).

Значення FPIS та FNIS обчислюються за формулами:

$$V^+ = (\tilde{v}_1^+, \tilde{v}_2^+, \dots, \tilde{v}_M^+), \text{ де } \tilde{v}_j^+ = \max_{i=\overline{1, N}} \{v_{ijm}\} \quad j = \overline{1, M}, \quad (4.24)$$

$$V^- = (\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \dots, \tilde{v}_M^-), \text{ де } \tilde{v}_j^- = \min_{i=\overline{1, N}} \{v_{ij1}\}, \quad j = \overline{1, M}, \quad (4.25)$$

де $m = 3$ для трикутних НЧ; $m = 4$ для трапецієвидних НЧ.

Крок 6. Обчислення відстаней від кожної альтернативи до FPIS і FNIS.

Відстань від альтернативи A_i до FPIS d_i^+ і до FNIS d_i^- обчислюється за формулами:

$$d_i^+ = \sum_{j=1}^M d_{metrics}(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+), \quad (4.26)$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^M d_{metrics}(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-), i = \overline{1, N}, \quad (4.27)$$

де $d_{metrics}(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+)$ і $d_{metrics}(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-)$ за вибором користувача визначається так:

– для евклідової метрики, з урахуванням (4.1):

$$d_{metrics}(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+) = d_E(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (v_{ijk} - v_{jk}^+)^2}, \quad (4.28)$$

$$d_{metrics}(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-) = d_E(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (v_{ijk} - v_{jk}^-)^2}, \quad (4.29)$$

– для мангеттенської метрики, з урахуванням (4.3):

$$d_{metrics}(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+) = d_{MH}(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+) = \sum_{k=1}^n |v_{ijk} - v_{jk}^+|, \quad (4.30)$$

$$d_{metrics}(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-) = d_{MH}(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-) = \sum_{k=1}^n |v_{ijk} - v_{jk}^-|, \quad (4.31)$$

– для метрики Чебишова, з урахуванням (4.5):

$$d_{metrics}(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+) = d_\infty(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+) = \max_{k=\overline{1, n}} |v_{ijk} - v_{jk}^+|, \quad (4.32)$$

$$d_{metrics}(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-) = d_\infty(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-) = \max_{k=\overline{1, n}} |v_{ijk} - v_{jk}^-|, \quad (4.33)$$

– для метрики Мінковського, з урахуванням (4.9):

$$d_{metrics}(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+) = d_M(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+) = \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |v_{ijk} - v_{jk}^+|^p \right)^{\frac{1}{p}}, \quad (4.34)$$

$$d_{metrics}(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-) = d_M(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-) = \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |v_{ijk} - v_{jk}^-|^p \right)^{\frac{1}{p}}, \quad (4.35)$$

при $p \geq 3$,

– для метрики Геммінга, з урахуванням (4.11):

$$d_{metrics}(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+) = d_H(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+) = \sum_{k=1}^n |v_{ijk} - v_{jk}^+|, \quad (4.36)$$

$$d_{metrics}(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-) = d_H(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-) = \sum_{k=1}^n |v_{ijk} - v_{jk}^-|, \quad (4.37)$$

де

$$|v_{ijk} - v_{jk}^+| = \begin{cases} 1, & v_{ijk} \neq v_{jk}^+ \\ 0, & v_{ijk} = v_{jk}^+ \end{cases}, \quad (4.38)$$

$$|v_{ijk} - v_{jk}^-| = \begin{cases} 1, & v_{ijk} \neq v_{jk}^- \\ 0, & v_{ijk} = v_{jk}^- \end{cases}, \quad (4.39)$$

$n = 3$ – для трикутних НЧ і $n = 4$ – для трапецієвидних НЧ.

Крок 7. Обчислення коефіцієнтів близькості до FPIS і FNIS для кожної альтернативи за різними метриками.

Коефіцієнт близькості CC_i^- для кожної альтернативи A_i до нечіткого негативного ідеального рішення обчислюється за такою формулою:

$$CC_i^- = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}, i = \overline{1, N}. \quad (4.40)$$

Коефіцієнт близькості CC_i^+ для кожної альтернативи A_i до нечіткого позитивного ідеального рішення обчислюється за такою формулою:

$$CC_i^+ = \frac{d_i^+}{d_i^- + d_i^+}, i = \overline{1, N}. \quad (4.41)$$

Крок 8. Ранжування альтернатив за різними метриками. На цьому кроці за кожною обраною метрикою визначається найкраща альтернатива A^* як альтернатива, яка знаходиться як най далі від FNIS, тобто з максимальним коефіцієнтом близькості CC_i^- і визначається так:

$$A^* = A_{i^*}, \quad (4.42)$$

де

$$i^* = \arg \max_{i=\overline{1, N}} \{CC_i^-\}, \quad (4.43)$$

або A^* обирається як альтернатива, яка найближча до FPIS, тобто з найменшим коефіцієнтом близькості CC_i^+ і визначається так:

$$A^* = A_{i^*}, \quad (4.44)$$

де

$$i^* = \arg \min_{i=1, \overline{N}} \{CC_i^+\}. \quad (4.45)$$

Отже, чим більше значення CC_i^- , тим ближче альтернатива A_i до нечіткого позитивного ідеального розв'язку V^+ та далі від нечіткого негативного ідеального розв'язку V^- , або чим менше значення CC_i^+ , тим ближче альтернатива A_i до нечіткого позитивного ідеального розв'язку V^+ та далі від нечіткого негативного ідеального розв'язку V^- . Альтернативи A_i впорядковуються за спаданням значень CC_i^- , або за зростанням значень CC_i^+ , що дозволяє визначити ранг кожної альтернативи R_i ($i = \overline{1, N}$) для обраних метрик. При цьому деякі альтернативи можуть мати однакові ранги, зокрема й ранг 1.

Крок 9. Виведення результатів. Після обчислення рангів альтернатив за обраними метриками результати подаються у табличній формі, структура якої наведена в таблиці 4.2, де R_{ji} – ранг альтернативи A_i ($i = \overline{1, N}$) за метрикою $d_{metrics_j}$ ($j = \overline{1, m}$), m – кількість обраних метрик.

Таблиця 4.2 – Виведення результатів модифікованого методу FTOPSIS [розроблено автором]

Метрики	Альтернативи	d_i^+	d_i^-	CC_i^-	Ранг альтернатив
$d_{metrics_1}$	A_1	d_{11}^+	d_{11}^-	CC_{11}^-	R_{11}
	A_2	d_{12}^+	d_{12}^-	CC_{12}^-	R_{12}

	A_N	d_{1N}^+	d_{1N}^-	CC_{1N}^-	R_{1N}
$d_{metrics_2}$	A_1	d_{21}^+	d_{21}^-	CC_{21}^-	R_{21}
	A_2	d_{22}^+	d_{22}^-	CC_{22}^-	R_{22}

	A_N	d_{2N}^+	d_{2N}^-	CC_{2N}^-	R_{2N}
...
$d_{metrics_m}$	A_1	d_{m1}^+	d_{m1}^-	CC_{m1}^-	R_{m1}
	A_2	d_{m2}^+	d_{m2}^-	CC_{m2}^-	R_{m2}

	A_N	d_{mN}^+	d_{mN}^-	CC_{mN}^-	R_{mN}

На рисунку 4.2 продемонстровано схему алгоритму модифікованого методу FTOPSIS.

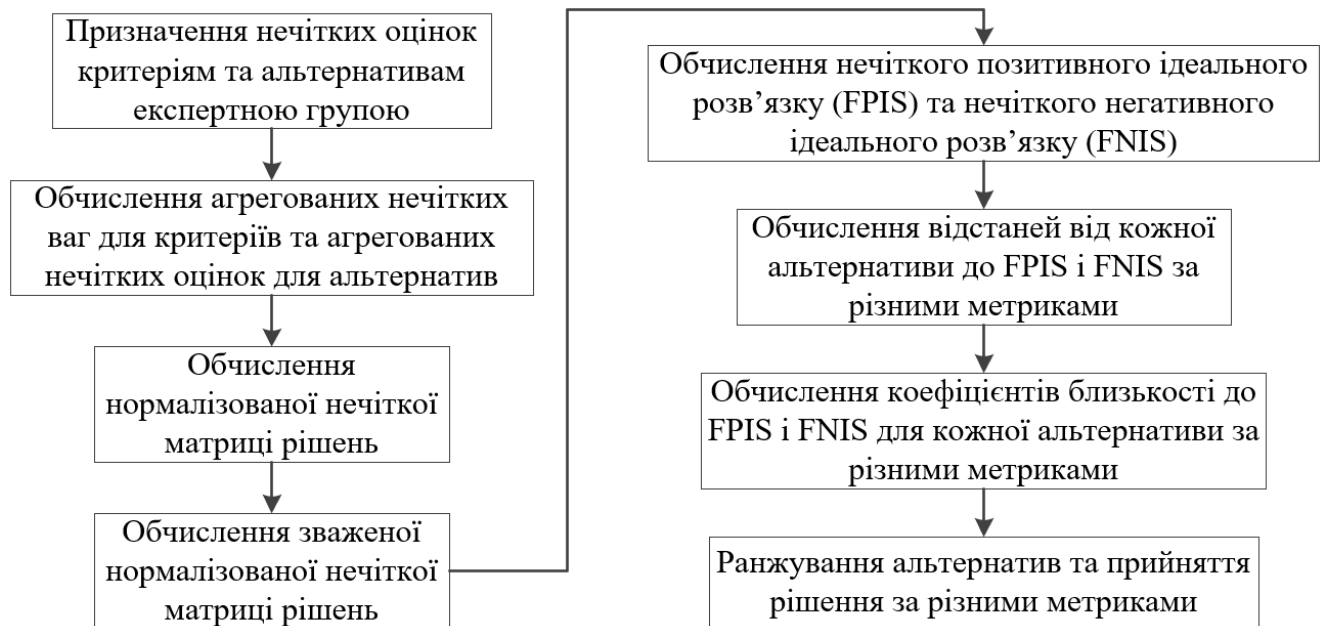


Рисунок 4.2 – Схема алгоритму модифікованого методу FTOPSIS [розроблено на основі [39, 40]]

Для порівняння результатів використання різних методів багатокритеріального прийняття рішень було обрано декілька модифікацій методу TOPSIS:

- 1) FT3НЧ – FTOPSIS із застосуванням трикутних НЧ (див. рис. 4.1 а);
- 2) FT4НЧ – FTOPSIS із застосуванням трапецієвидних НЧ (див. рис. 4.1 б);
- 3) TFW3НЧ – TOPSIS з нечіткими трикутними числами для визначення ваг критеріїв;
- 4) TFW4НЧ – TOPSIS з нечіткими трапецієвидними числами для визначення ваг критеріїв.

У методах TFW3НЧ, TFW4НЧ для того, щоб спростити експертне оцінювання ваг критеріїв w_j , $j = \overline{1, M}$, які в сумі повинні дорівнювати одиниці, в класичному методі TOPSIS були використані лінгвістичні оцінки ваг кожного критерію C_j , яким відповідають нечіткі числа $\tilde{w}_j = (w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{jn})$, $j = \overline{1, M}$, де $n = 3$ для трикутних НЧ і $n = 4$ для трапецієвидних НЧ. Процес дефазифікації нечітких чисел відбувався за таким правилом:

1. *Знаходження ваг критеріїв як середнього значення параметрів нечітких оцінок.* Для кожного $\tilde{w}_j = (w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{jn})$ обчислюється середнє арифметичне його параметрів:

$$w_j = \frac{w_{j1} + w_{j2} + \dots + w_{jn}}{n}, j = \overline{1, M}, \quad (4.46)$$

де $n = 3$ для трикутних НЧ і $n = 4$ для трапецієвидних НЧ.

2. *Обчислення суми середніх значень w_j :*

$$ws = \sum_{j=1}^M w_j. \quad (4.47)$$

3. *Нормалізація середніх значень ваг.* Кожне середнє значення w_j перетворюється на частку від загальної суми ws , щоб усі нормалізовані оцінки в результаті знаходились у діапазоні $[0,1]$ і їхня сума дорівнювала 1:

$$wn_j = \frac{w_j}{ws}, j = \overline{1, M}. \quad (4.48)$$

Для наочного відображення відмінностей між результатами при застосуванні різних метрик та методів, запропоновано методику для порівняння результатів застосування методів прийняття рішень TOPSIS, FTOPSIS та їх модифікацій, одержаних за допомогою різних метрик для оцінювання коефіцієнту близькості до нечіткого позитивного ідеального розв'язку (FPIS) та нечіткого негативного ідеального розв'язку (FNIS).

Нехай є набір методів M_1, M_2, \dots, M_n , кожен із яких дає коефіцієнти близькості кожної альтернативи A_i ($i = \overline{1, N}$) за різними метриками у вигляді матриці:

$$E^{Mq} = \begin{pmatrix} CC_{11}^q & CC_{12}^q & \dots & CC_{1m}^q \\ CC_{21}^q & CC_{22}^q & \dots & CC_{2m}^q \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CC_{N1}^q & CC_{N2}^q & \dots & CC_{Nm}^q \end{pmatrix}, \quad (4.49)$$

де $q = \overline{1, n}$ – номер методу M_q , CC_{ij}^q – значення коефіцієнтів близькості для альтернатив A_i ($i = \overline{1, N}$), що отримані за методом M_q за метрикою з номером j ($j = \overline{1, m}$), при цьому за коефіцієнти близькості можна обрати як коефіцієнти CC_i^- виду (4.40), так і CC_i^+ виду (4.41).

Тоді матриця $D^{X,Y}$ відхилень між результатами двох методів X і Y ($X = \overline{1, n-1}, Y = \overline{2, n}, X \neq Y$) обчислюється за формулою:

$$D^{X,Y} = \begin{pmatrix} |CC_{11}^X - CC_{11}^Y| & |CC_{12}^X - CC_{12}^Y| & \dots & |CC_{1m}^X - CC_{1m}^Y| \\ |CC_{21}^X - CC_{21}^Y| & |CC_{22}^X - CC_{22}^Y| & \dots & |CC_{2m}^X - CC_{2m}^Y| \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ |CC_{N1}^X - CC_{N1}^Y| & |CC_{N2}^X - CC_{N2}^Y| & \dots & |CC_{Nm}^X - CC_{Nm}^Y| \end{pmatrix}, \quad (4.50)$$

де CC_{ij}^X і CC_{ij}^Y – значення коефіцієнтів близькості у відповідних методах X і Y , N – кількість альтернатив, n – кількість методів, m – кількість метрик в кожному із застосованих методів.

Матриця відхилень $D^{(X,Y)}$ використовується для виявлення розбіжностей у значеннях коефіцієнтів близькості, отриманих за різними метриками. Описану методику порівняння коефіцієнтів близькості за різними метриками можна узагальнити і на інші методи MADM, де це передбачено.

Експеримент щодо порівняння результатів, одержаних за допомогою різних модифікацій методу TOPSIS, за розробленою методикою наведено в розділі 5.

4.5 Висновки до розділу 4

У межах четвертого розділу розглянуто інформаційну ситуацію прийняття рішень в умовах ризику. Наведено задачу прийняття рішень в умовах ризику і методи її розв'язання.

Також детально розглянуто інформаційну ситуацію прийняття рішень в умовах невизначеності. Наведено задачу прийняття рішень в умовах невизначеності і методи її розв'язання. Також наведено співвідношення між різними типами невизначеності.

В межах задачі тайм-менеджменту як задачі багатокритеріального прийняття рішень запропоновано комбінований метод розв'язання задачі тайм-менеджменту, що поєднує в собі метод аналізу ієрархії та метод матриці Ейзенхауера. Отримані експериментальні результати підтверджують доцільність використання розробленого підходу до класифікації задач тайм-менеджменту, що використовує поєднання методу матриці Ейзенхауера та методу аналізу ієрархій.

Запропонований та досліджений метод доцільно застосовувати у випадку, коли необхідні числові обрахунки в якості підтвердження результату аналізу задач, або коли потрібно проаналізувати відносно рівнозначні між собою задачі, при оцінюванні яких потрібно математично обґрунтувати послідовність їх виконання.

За допомогою цього комбінованого методу користувачу надається можливість оцінювати задачі як альтернативи за критеріями, які відповідають класифікації задач у матриці Ейзенхауера. У результаті чого отримується розбиття вхідних задач на чотири класи матриці Ейзенхауера, а також визначаються пріоритети для задач кожного класу в числовому еквіваленті. Як рекомендація для прийняття рішення буде одержано послідовність виконання задач у відповідності до їх важливості та пріоритету.

До переваг запропонованого методу можна віднести можливість автоматизувати процес розподілу задач за критеріями важливості, а також отримання числових вагових значень пріоритетів виконання поставлених задач.

До недоліків методу можна віднести додатковий час, який витрачається користувачем на парне порівняння задач за МАІ. Але, за допомогою інформаційних технологій даний процес частково автоматизується, що значно його пришвидшує та робить доцільним.

Також в межах розділу детально розглянуто інформаційну ситуацію прийняття рішень в умовах нечіткої інформації. Наведено задачу прийняття рішень в умовах нечіткої інформації і методи її розв'язання.

В межах задачі багатокритеріального прийняття рішень за модифікованим методом FUZZY TOPSIS проведено аналіз найпопулярніших методів багатокритеріального прийняття рішень, зокрема таких методів, як TOPSIS, FTOPSIS, FАHP. Особливу увагу приділено аналізу різних популярних метрик для визначення відстаней між нечітким позитивним та нечітким негативним ідеальним рішеннями у методі FTOPSIS. За результатами цього аналізу запропоновано модифікований метод Fuzzy TOPSIS для вибору ефективної альтернативи в задачі багатокритеріального прийняття рішень в умовах нечіткої інформації на основі різних метрик і використання результатів групової експертизи. На прикладі

реальної задачі про вибір стандарту управління ризиками в ІТ-проектах продемонстровано, як використання різних метрик впливає на точність і надійність вибору ефективного рішення. Запропоновано методику для порівняння результатів застосування різних методів прийняття рішень, зокрема методів FTOPSIS із застосуванням трикутних та трапецієвидних нечітких чисел, TOPSIS з трикутними та трапецієвидними нечіткими числами для визначення ваг критеріїв, одержаних за допомогою різних метрик для обчислення коефіцієнту близькості до нечіткого позитивного ідеального розв'язку (FPIS) та нечіткого негативного ідеального розв'язку (FNIS).

У цьому розділі отримано такі складові наукової новизни дисертаційного дослідження:

- запропоновано модифікований метод FTOPSIS з використанням результатів групової експертизи та адаптацією популярних метрик для обчислення коефіцієнту близькості до нечіткого позитивного та нечіткого негативного ідеальних розв'язків для трикутних та трапецієвидних нечітких чисел, зокрема, евклідової метрики, мангеттенської метрики, метрик Чебишова, Мінковського і Геммінга, що забезпечує збереження властивостей метрик і дозволяє більш точно оцінювати відстані між нечіткими ідеальним та антиідеальним рішеннями;

- запропоновано підхід для визначення ваг критеріїв у класичному методі TOPSIS через використання лінгвістичних оцінок, що дозволяє більш гнучко враховувати невизначеність та суб'єктивність експертних оцінок і є важливим для реальних сценаріїв прийняття рішень;

- запропоновано методику для порівняння результатів застосування різних методів, зокрема FTOPSIS із застосуванням трикутних та трапецієвидних нечітких чисел, TOPSIS з трикутними та трапецієвидними нечіткими числами, одержаними за різними метриками, що надає можливість проаналізувати масштаби відхилень та оцінити якість роботи експертів.

Результати досліджень четвертого розділу опубліковані в роботах [74]-[77].

Список використаних джерел до розділу 4

1. Borgonovo, Emanuele & Cappelli, Veronica Roberta & Maccheroni, F. & Marinacci, M.. (2017). Risk Analysis and Decision Theory: A Bridge. *European Journal of Operational Research*. 264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.06.059>.
2. Kahneman, D., & Tversky, A. Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk. // *Econometrica*, 47(2), 1979, P. 263–291.
3. Ус С.А. Моделі й методи прийняття рішень: навч. посіб. / С.А. Ус, Л.С. Коряшкіна; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». 2-ге вид. випр. Дніпро : НТУ «ДП», 2018. 300 с.
4. Knight, F. H. *Risk, Uncertainty, and Profit*. — New York: Dover Publications, 2017
5. Schultz, Martin & Mitchell, Keneth & Harper, Brian & Bridges, Todd. (2010). *Decision Making Under Uncertainty*. 92 p.
6. Time management definition. URL: <https://dictionary.cambridge.org/us/dictionary/english/time-management> (дата звернення: 25.05.2025).
7. Time Management: Meaning, Importance and Benefits. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/time-management-meaning-importance-and-benefits> (дата звернення: 25.05.2025).
8. Time Management for a Small Business. Financial Education Curriculum. Participant guide U.S. Small Business Administration. Updated 09-2016. P.22.
9. Тайм-менеджмент в системі управління закладом вищої освіти. Oleksandra Gubar, Oleksandr Yakushev, *Bulletin of the Cherkasy Bohdan Khmelnytsky National University. Economic Sciences*, Issue 3, 2021/9/29. P. 47–56. DOI: <https://doi.org/10.31651/2076-5843-2021-3-47-56>.
10. Godefroy Ch. *The Complete Time Management System*. N.Y.: Positive Club, 2016. 282 p.
11. Campbell G. *Time Management: The 8 Laws of Time Management*. N.Y.: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2017. 68 p.
12. Davis R. *Time Management: How to Find the Time and Motivation to be Productive and Get Things Done*. N.Y.: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2017. 66 p.

13. Gopi S. Time Management: Step by Step Skill. Development Guide to Increase Productivity, Focus and End Procrastination. Nashville (Indiana): Unlimited, 2016. 58 p.
14. Кендюхов О.В., Ягельська К.Ю. Економічний підхід до вивчення часу. Маркетинг і менеджмент інновацій. 2012. № 3. С. 141–148.
15. Євтушенко Г.І., Дерев'янко В.М. Аналіз стану управління робочим часом та шляхи підвищення ефективності застосування “Тайм-менеджменту” в організації. Збірник наукових праць Національного університету державної податкової служби України. 2014. № 1. С. 88–96.
16. Петрушенко М.М., Бондар Т.В. Управління часом як засіб досягнення стратегічного розвитку підприємства. Вісник Сумського державного університету. Серія “Економіка”. 2009. № 1. С. 10–18.
17. Харук К.Б., Скриньковський Р.М., Крукевич Н.М. Діагностика тайм-менеджменту підприємств на засадах бізнес-індикаторів: ефективність та продуктивність. Економіка та держава. 2015. № 1. С. 56–59.
18. Писаревська Г.І. Використання тайм-менеджменту для підвищення ефективності управління персоналом. Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія “Економічні науки”. 2016. Вип. 20. Ч. 1. С. 148–153.
19. Ізюмцева Н.В., Недождій В.В. Тайм-менеджмент як основа ефективного функціонування сучасного підприємства. Інфраструктура ринку : електронний науково-практичний журнал. 2018. № 25. С. 305–309. URL: <http://dspace.ubs.edu.ua/jspui/handle/123456789/1696> (дата звернення: 25.05.2025).
20. Макаренко С.М., Олійник Н.М., Лущик К.І. Визначення оптимального виробничого навантаження як основи підвищення продуктивності праці працівників підприємства. Науковий вісник Міжнародного гуманітарного університету. Серія “Економіка і менеджмент”. 2017. № 26/2. С. 51–54.
21. Тайм-менеджмент, або мистецтво управління часом. URL: <https://vseosvita.ua/library/tajm-menedzment-abo-mistectvo-upravlinna-casom-42519.html> (дата звернення: 25.05.2025).
22. Тайм менеджмент як спосіб ефективної організації робочого часу. URL: <http://conf-cv.at.ua/forum/96-962-1> (дата звернення: 25.05.2025).

23. Принципи тайм-менеджменту. URL: <http://kerivnyk.info/2014/11/pryntsy-py-tajm-menedzhmentu.html> (дата звернення: 25.05.2025).
24. Doran G. T. There's a S.M.A.R.T. way to write management's goals and objectives. *Management Review*. 1981. Vol. 70, № 11. P. 35–36.
25. Метод Помодоро. URL: <https://www.welldone.org.ua/metod-pomodoro-shhob-bilshe-vstigati> (дата звернення: 25.05.2025).
26. Як стати продуктивнішим за допомогою «коробки Ейзенхауера». URL: <https://dvokrapka.com/self/2016/03/yak-staty-produktyvnishym-za-dopomogoyu-korobky-ejzenhauera/> (дата звернення: 25.05.2025).
27. Збірник популярних технік тайм-менеджменту. URL: <https://prohr.rabota.ua/sbornik-populyarnyih-tehnik-taym-menedzhmenta> (дата звернення: 25.05.2025).
28. «Формула «10-3-2-1-0» зарядить вас бадьорістю на весь день. URL: <https://znaj.ua/popcorn/formula-10-3-2-1-0-zaryadyt-vas-badoristyu-na-ves-den> (дата звернення: 25.05.2025).
29. Thomas L. Saaty, The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation; McGraw-Hill International Book Company, 1980, 287 p.
30. Ngandam Mfondoum, Alfred Homere & Tchindjang, Mesmin & Mfondoum, Valery & Makouet, Isabelle. (2019). Eisenhower matrix * Saaty AHP = Strong actions prioritization? Theoretical literature and lessons drawn from empirical evidences. VOLUME II. P. 13–27.
31. Ap, Dita & Sani, Asrul & M.Ak, Yanti & Hindardjo, Anton & Adrial, & Yuliza, Mai & Khristiana, Yenni & Husain, T. & Pasaman, Ilmu & Barat, Pasaman & Ekonomi, Ilmu & Surakarta, Adi & Corresponding, Indonesia. (2021). Application of Eisenhower matrix and analytic hierarchy process for decision support system with the SAW Method. *International Journal of Innovative Research & Growth*. 2. pp. 147–152.
32. Rafke, H.D., Lestari, Y.D. Simulating Fleet Procurement in an Indonesian Logistics Company. (2017) *Asian Journal of Shipping and Logistics*, 33 (1), pp. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2017.03.001>.
33. Alpaydin, Ethem. Introduction to Machine Learning. Second Edition. MIT Press. 2010. ISBN 978-0-262-01243-0. 579 p.

34. Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X).
35. Zadeh, L. A. (1973). Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-3(1), 28-44. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSMC.1973.4309314>.
36. Ross, T. J. (2004). *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. Wiley. 607 p.
37. Pedrycz, W. (2013). *Fuzzy Control and Fuzzy Systems*. Springer. 368 p.
38. Волошин О.Ф., Мащенко С.О. Моделі та методи прийняття рішень: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / О.Ф. Волошин, С.О. Мащенко. 3-є вид., перероб. К.: «Видавництво Людмила», 2018. 292 с.
39. Chen, C.-T. (2000). Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy Sets and Systems*, 114(1), 1–9.
40. Chen, C. T., Lin, C. T., & Huang, S. F. (2006). A fuzzy approach for supplier evaluation and selection in supply chain management. *International Journal of Production Economics*, 102, 289–301.
41. Mamdani, E. H., & Assilian, S. (1975). An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1), 1-13. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(75\)80002-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(75)80002-2).
42. Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence. Front Cover. Bart Kosko. Prentice Hall, 1992. Computers. 449 p.
43. H. Pan and L. Liu, Fuzzy Bayesian networks-a general formalism for representation, inference and learning with hybrid Bayesian networks, *ICONIP'99. ANZIIS'99 & ANNES'99 & ACNN'99. 6th International Conference on Neural Information Processing. Proceedings (Cat. No.99EX378)*, Perth, WA, Australia, 1999, pp. 401-406 vol.1, DOI: <https://doi.org/10.1109/ICONIP.1999.844022>.
44. Fuzzy Clustering – ML. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/ml-fuzzy-clustering/> (дата звернення: 25.05.2025).
45. Ulengin, F., Ilker Topcu, Y., Onsel Sahin, S. (2001). An Artificial Neural Network Approach to Multicriteria Model Selection. In: Köksalan, M., Zionts, S. (eds) *Multiple Criteria Decision Making in the New Millennium. Lecture Notes in*

- Economics and Mathematical Systems, vol 507. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-56680-6_9.
46. Зайченко Ю.П. Нечіткі моделі та методи в інтелектуальних системах: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів / Ю. П. Зайченко; за заг.ред. М. З. Згуровський. Київ: Слово, 2008. 344 с.
 47. Zgurovsky, M.Z., Zaychenko, Y.P. (2016). Problem of Fuzzy Portfolio Optimization Under Uncertainty and Its Solution with Application of Computational Intelligence Methods. In: The Fundamentals of Computational Intelligence: System Approach. Studies in Computational Intelligence, vol 652. Springer, Cham. P. 349–371. DOI: 10.1007/978-3-319-35162-9_9.
 48. Мулеса, О., Снитюк, В., Герзанич, С. (2020). Метод нечіткої класифікації на основі послідовного аналізу Вальда. *Automation of Technological and Business Processes*, 11(4), pp. 35-42. DOI: 10.15673/atbp.v11i4.1597.
 49. Гнатієнко, Г. М., Гнатієнко, О. Г. (2024). Метод визначення нечітких значень відносної важливості характеристик альтернатив з використанням способу нашарування. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія «Математика і інформатика»*, 45(2), Р. 172–187. ISSN 2616-7700 (print) ISSN 2708-9568 (electronic). DOI: 10.24144/2616-7700.2024.45(2).172-187.
 50. Matviychuk, A., Lukianenko, O., Miroshnychenko, I. (2019). Neuro-fuzzy model of country's investment potential assessment. *Fuzzy economic review*, 24(2), P. 65-88. DOI: 10.25102/fer.2019.02.04.
 51. Fedorov E. Fuzzy expert decision support system for foreign direct investment: a swarm metaheuristic approach / E. Fedorov, L. Kibalnyk; L. Petkova; M. Leshchenko, V. Pasenko // CEUR Workshop Proceedings, 2023. Vol.3465. P. 47-60 URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3465/paper04.pdf> (дата звернення: 25.05.2025).
 52. Hwang, C.L., Yoon K. Methods for Multiple Attribute Decision Making. In: Multiple Attribute Decision Making. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Springer, Berlin, Heidelberg, 1981. Vol 186. P. 58-191. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9_3.

53. Yoon K. A reconciliation among discrete compromise situations. *Journal of the Operational Research Society*, 1987. 38 (3). P. 277-286. DOI: <https://doi.org/10.1057/jors.1987.44>.
54. Hwang, C.L.; Lai, Y.J.; Liu, T.Y. A new approach for multiple objective decision making. *Computers and Operational Research. Computers & Operations Research*, 1993. 20 (8). P. 889-899. DOI: [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(93\)90109-v](https://doi.org/10.1016/0305-0548(93)90109-v).
55. Dubois, D., & Prade, H. (1980). *Fuzzy sets and systems: Theory and applications*. Academic Press. 411 p.
56. Zadeh, L. A. (1970). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. *Information Sciences*, 8, 199–249.
57. Chen, S. J., & Hwang, C. L. (1992). *Fuzzy multiple attribute decision-making: Methods and applications* (Vol. 375). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
58. Carlsson, C., & Fuller, R. (1996). Fuzzy multiple criteria decision making: Recent developments. *Fuzzy Sets and Systems*, 78(2), 139–153.
59. Herrera, F., Alonso, S., Chiclana, F., & Herrera-Viedma, E. (2009). Computing with words in decision making: Foundations, trends, and prospects. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 8(4), 337–364.
60. Mardani, A., Jusoh, A., & Zavadskas, E. K. (2015). Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications – Two decades review from 1994 to 2014. *Expert Systems with Applications*, 42, 4126–4148.
61. Makki, A., & Abdulaal, R. (2023). A hybrid MCDM approach based on fuzzy MEREC-G and fuzzy RATMI. *Mathematics*, 11, 3773. DOI: <https://doi.org/10.3390/math11173773>.
62. Kustiyahningsih, Y., Rahmanita, E., Khusnul Khotimah, B., & Purnama, J. (2024). Type-2 fuzzy ANP and TOPSIS methods based on trapezoid fuzzy number with a new metric. *International Journal of Advances in Intelligent Informatics*, 10, 239. DOI: <https://doi.org/10.26555/ijain.v10i2.1285>.
63. Rane, N., & Choudhary, S. (2023). Fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS as an effective and powerful multi-criteria decision-making (MCDM) method for subjective judgments in

- selection process. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, 5, 3786–3799. DOI: <https://doi.org/10.56726/IRJMETs36629>.
64. Yin, H., Li, X., & Gao, Y. (2020). Relative Euclidean distance with application to TOPSIS and estimation performance ranking. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSMC.2020.3017814>.
 65. Han, F., Alkhawaji, R., & Shafieezadeh, M. (2024). Evaluating sustainable water management strategies using TOPSIS and fuzzy TOPSIS methods. *Applied Water Science*, 15, DOI: <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02336-7>.
 66. Talukdar, P., & Dutta, P. (2019). A comparative study of TOPSIS method via different distance measure. *International Journal of Research in Advent Technology*, 7, 118–126. DOI: <https://doi.org/10.32622/ijrat.75201937>.
 67. Shyur, H.-J., & Shih, H.-S. (2024). Resolving rank reversal in TOPSIS: A comprehensive analysis of distance metrics and normalization methods. *Informatica*, 1–22. DOI: <https://doi.org/10.15388/24-INFOR576>.
 68. Arman, H., Hadi-Vencheh, A., Kiani Mavi, R., Khodadadipour, M., & Jamshidi, A. (2022). Revisiting the interval and fuzzy TOPSIS methods: Is Euclidean distance a suitable tool to measure the differences between fuzzy numbers? *Complexity*, 2022, Article 7032662, 11 pages. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/7032662>.
 69. Deza, M. M., & Deza, E. (2016). *Encyclopedia of distances* (4th ed.). Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-52844-0>.
 70. Rudin, W. (1987). *Real and complex analysis* (3rd ed.). McGraw-Hill. 433 p.
 71. Black, P. E. (2019). Manhattan distance. *Dictionary of Algorithms and Data Structures*. URL: <https://xlinux.nist.gov/dads/HTML/manhattanDistance.html> (дата звернення: 25.05.2025).
 72. Hamming, R. W. (1950). Error detecting and error correcting codes. *Bell System Technical Journal*, 29(2), 147–160.
 73. Awasthi, A., Chauhan, S. S., & Goyal, S. K. (2011). A multi-criteria decision making approach for location planning for urban distribution centers under uncertainty. *Mathematical and Computer Modelling*, 53, 98–109.

74. Anton Maksymov, Yurii Tryus. Combined Method of Solving Time Management Tasks and Its Implementation in the Decision Support System. *Information Technology for Education, Science, and Technics Proceedings of ITEST 2022*. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. Vol. 178. Springer. 2023. pp. 131-146. ISSN 2367-4512 ISSN 2367-4520 (electronic). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-35467-0_9. Scopus, Web of Science.
75. Maksymov, A., & Tryus, Yu. (2025). Information technology for solving the multi-criteria decision-making problem using the modified Fuzzy TOPSIS method. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*, 30(1), pp. 91-106. ISSN 2306-4412 ISSN 2708-6070 (electronic). DOI: <https://doi.org/10.62660/bcstu/1.2025.91>.
76. Максимов А. Є. Web-орієнтований ресурс для класифікації задач до матриці Ейзенхауера за методом аналізу ієрархій. *Тези доповідей VI Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології в освіті, науці і техніці» (ІТОНТ-2022)*, (Черкаси, 23-25 червня 2022 р.) [Електронний ресурс]. Черкаси : ЧДТУ, 2022. С. 41-44. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15540361>.
77. Максимов А.Є. Інформаційна технологія застосування методу TOPSIS для задач пошуку проєктів для ІТ-компанії. *Збірник тез доповідей II Міжнар. наук.-практич. конфер. «Інновації та перспективні шляхи розвитку інформаційних технологій»* (06 груд. 2023 р., м. Черкаси) [Електронний ресурс] / упоряд. : Т. О. Прокопенко, Я. В. Тарасенко ; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. Черкаси : ЧДТУ, 2023. 277 с. С. 73-75. URL: https://drive.google.com/file/d/1f0cc_HaFDH4G3AI_NfwqfTjaMjyWBvkc/view (дата звернення: 25.05.2025).

РОЗДІЛ 5

ПРОЄКТУВАННЯ І РОЗРОБКА ВЕБ-ОРІЄНТОВАНОЇ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ТА ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ

5.1 Концептуальне проєктування веб-орієнтованої СППР

Концептуальне (інфологічне) проєктування передбачає побудову семантичної моделі предметної області, що являє собою інформаційну модель найвищого рівня абстракції. Зазначена модель формується незалежно від конкретної системи керування базами даних (СКБД) та обраної моделі даних [1].

Терміни «семантична модель», «концептуальна модель» та «інфологічна модель» розглядаються як синонімічні. Крім того, у даному контексті можуть рівноправно застосовуватися поняття «модель бази даних» та «модель предметної області» (наприклад, «концептуальна модель бази даних» і «концептуальна модель предметної області»), оскільки така модель водночас є відображенням реальної задачі та проєктованої бази даних для її опису [1].

Структура та зміст концептуальної моделі бази даних визначаються вибраним формальним апаратом. На рисунку 5.1 подано концептуальну модель функціонування системи підтримки прийняття рішень (СППР).

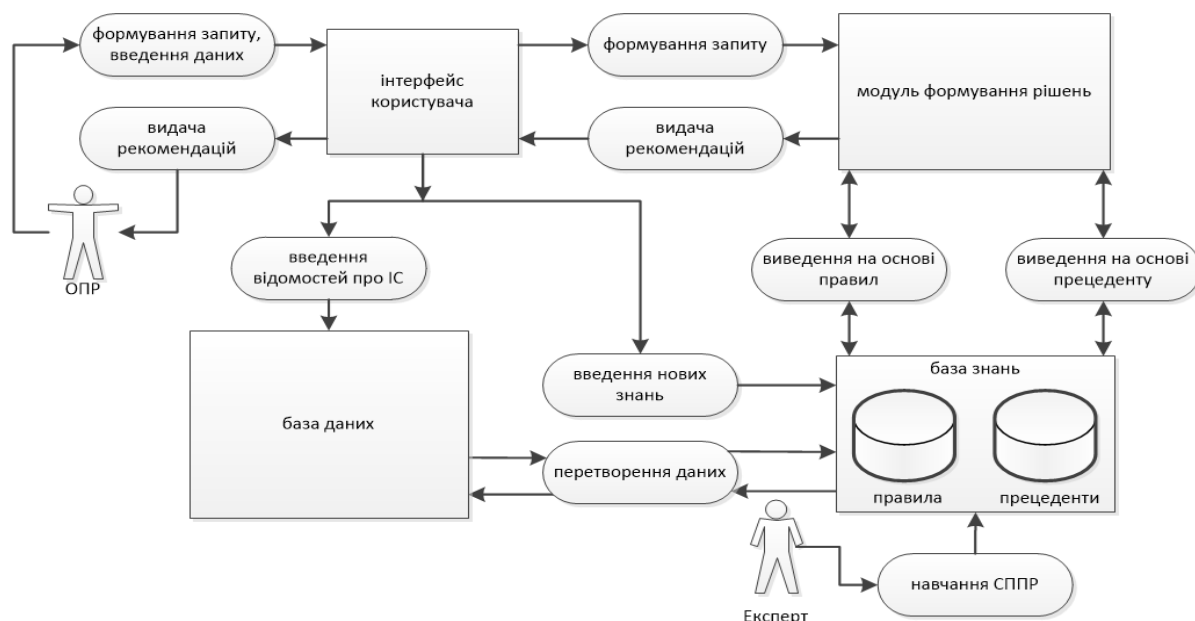


Рисунок 5.1 – Концептуальна модель функціонування СППР [розроблено автором]

СППР «Decisioner» [2] складається з двох частин: інформаційно-реєстраційної частини та СППР з реалізацією методів для прийняття рішень «Decisioner». Після впровадження до СППР можна буде потрапити з основного домену сайту компанії, оскільки взаємозв'язок на сайті встановлюється на піддоменному рівні.

СППР «Decisioner» має двокомпонентну структуру, яка включає інформаційно-реєстраційну частину та СППР з реалізацією методів прийняття рішень «Decisioner». Після впровадження СППР доступна з основного домену вебсайту компанії завдяки встановленню взаємозв'язку на піддоменному рівні.

Концептуальну модель організації піддоменних взаємозв'язків при впровадженні СППР подано на рисунку 5.2.

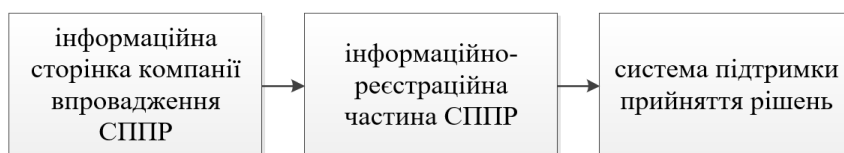


Рисунок 5.2 – Концептуальна модель організації піддоменних взаємозв'язків СППР «Decisioner» [розроблено автором]

На наступному етапі необхідно визначити структуру інформаційної системи або вебсторінки компанії з метою визначення найкращого місця розміщення посилання на СППР «Decisioner». Структуру інформаційно-реєстраційної частини СППР наведено на рисунку 5.3.

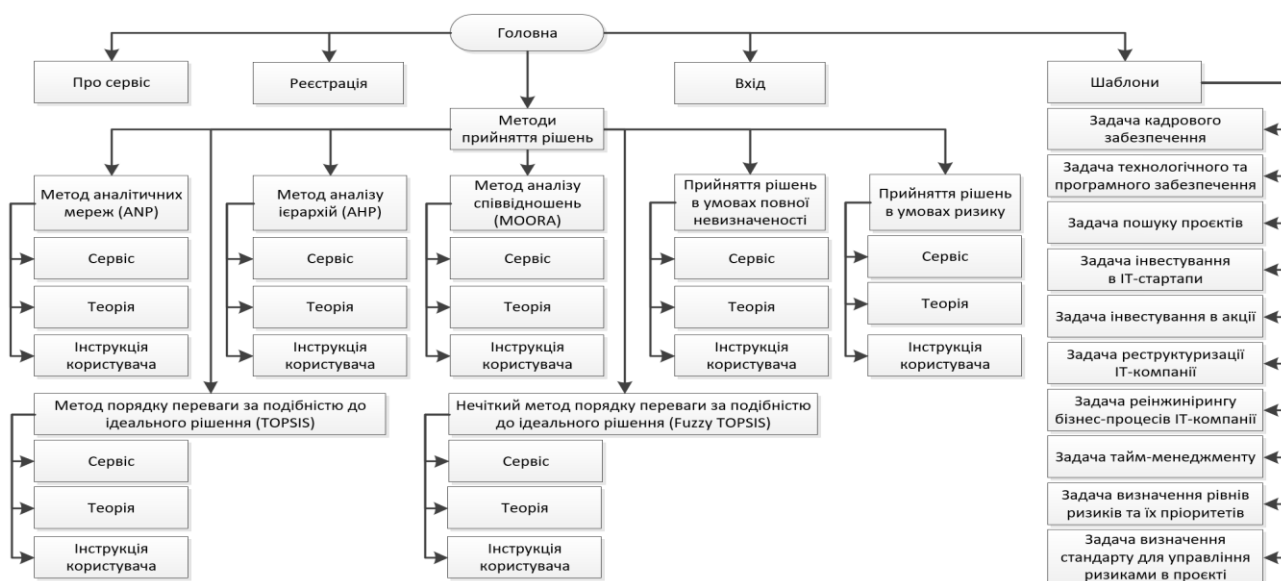


Рисунок 5.3 – Структура інформаційно-реєстраційної частини СППР [розроблено автором]

Структуру підсистеми підтримки прийняття рішень для компанії наведено на рисунку 5.4.

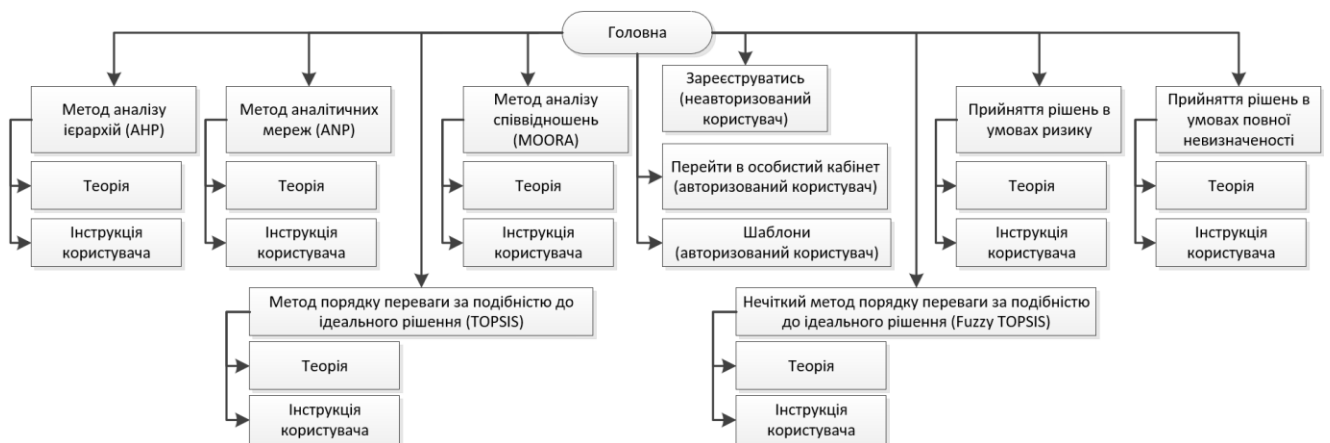


Рисунок 5.4 – Структура підсистеми підтримки прийняття рішень [розроблено автором]

У межах дисертаційного дослідження було обрано каскадну модель життєвого циклу програмного забезпечення, оскільки вимоги до СППР були чітко визначені на початковому етапі, а їх зміни протягом розробки малоймовірні. Такий підхід забезпечує послідовне виконання етапів розробки, що дозволяє досягти високої передбачуваності процесу та ефективного управління проєктом.

Таким чином, проведено концептуальне проєктування і, як результат, побудовано концептуальну модель роботи системи підтримки прийняття рішень.

5.2 Логічне проєктування веб-орієнтованої СППР

Перетворення концептуальної моделі на логічну модель, як правило, здійснюється відповідно до формалізованих правил. На етапі логічного проєктування враховуються особливості обраної моделі даних, однак специфіка конкретної системи керування базами даних (СКБД) може залишатися поза увагою. З огляду на те, що система передбачає різні ролі користувачів, було розроблено декілька логічних моделей. На рисунку 5.5 подано логічну модель дій адміністратора, який, як видно з моделі, має найбільший обсяг прав доступу. Логічну модель дій користувача наведено на рисунку 5.6.



Рисунок 5.5 – Логічна модель використання СППР для адміністратора
[розроблено автором]



Рисунок 5.6 – Логічна модель використання СППР для користувача [розроблено автором]

Проектування системи контролю доступу починається з етапу реєстрації користувача. В результаті успішної реєстрації користувачам надаються певні права доступу до інформаційних ресурсів системи, а також можливість отримати результати роботи за заданими критеріями для здійснення вибору.

Процес контролю доступу в системі буде проілюстровано за допомогою UML-діаграми поведінки, зокрема діаграми станів, яка є різновидом логічної моделі і відображає аспекти функціонування складної системи. Основною метою цієї діаграми є опис послідовностей станів і переходів, що разом характеризують поведінку елемента моделі протягом його життєвого циклу. Побудовану UML-діаграму станів системи контролю доступу представлено на рисунку 5.7. До

основних станів цієї системи відносяться: перевірка прав доступу, очікування, надання доступу та заборона доступу.

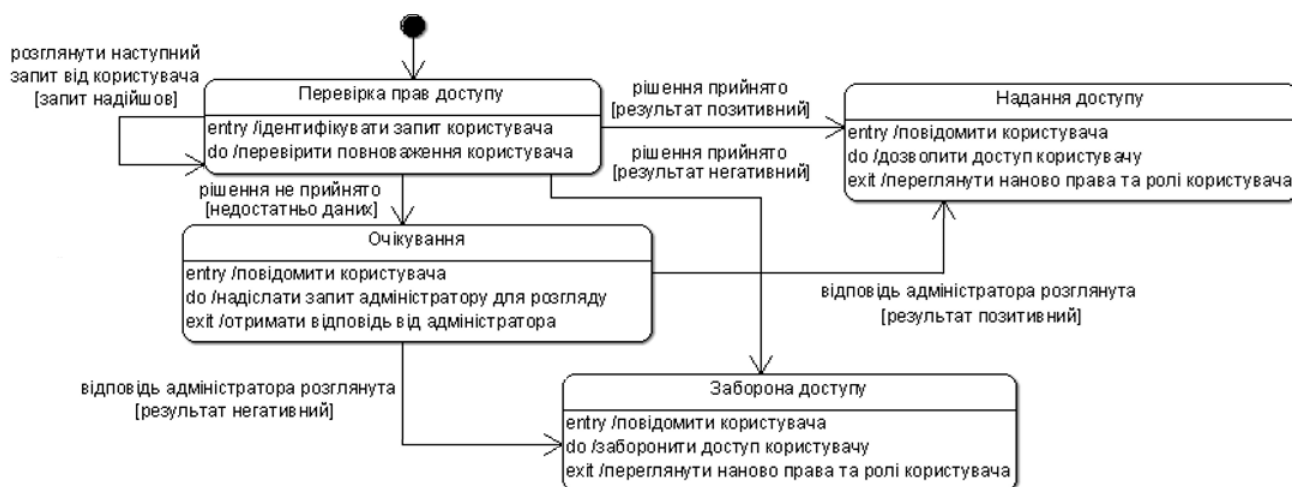


Рисунок 5.7 – UML-діаграма станів системи контролю доступу [розроблено автором]

Під час моделювання поведінки проєктованої або досліджуваної системи виникає потреба не лише у відображенні процесу зміни її станів, а й у деталізації особливостей алгоритмічної та логічної реалізації операцій, що виконуються системою. З цією метою створюються діаграми діяльності. Діаграму діяльності системи керування доступом наведено на рисунку 5.8.

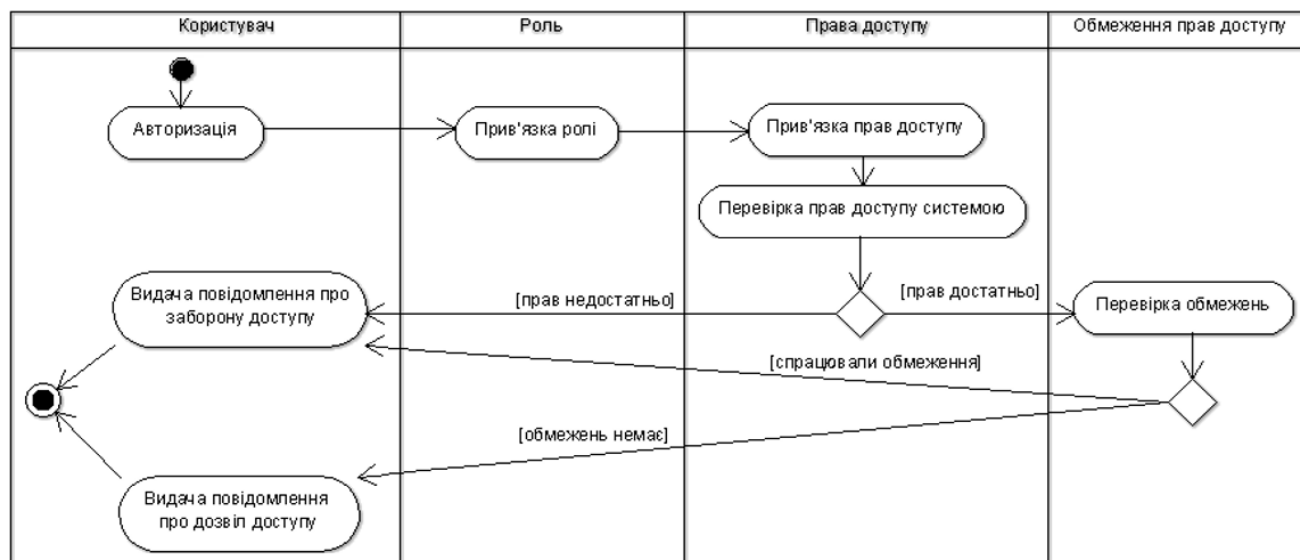


Рисунок 5.8 – UML-діаграма діяльності керування доступом у СППР [розроблено автором]

Діаграма діяльності спроектована з погляду Інженера системи, який де-факто розробляє систему контролю та керування правами доступу, створює необхідні

обмеження та ієрархічну структуру ролей для неї. Отже, основними аспектами діяльності є ті, що пов'язані з користувачем, ролями, правами доступу та обмеженнями прав доступу.

5.3 Засоби розробки веб-орієнтованої СППР

Важливою складовою при розробці будь-якої інформаційної системи, зокрема системи підтримки прийняття рішень, є вибір мови програмування. Як уже зазначалося, система підтримки прийняття рішень включає три основні компоненти: базу даних, базу моделей і програмну підсистему, яка охоплює систему керування базою даних (СКБД), систему керування базою моделей (СКБМ) і систему управління інтерфейсом користувача [3]. Відповідно, необхідно визначити технології, за допомогою яких будуть реалізовані ці компоненти. На рисунку 5.9 представлено логотипи мов програмування та технологій, що використані у відповідних модулях проєкту.



Рисунок 5.9 – Логотипи мов програмування та технологій впровадження в проєкті
[розроблено автором]

Далі наведено короткий опис мов програмування та технологій впровадження у відповідності до логотипів на рисунку 5.9.

У межах розробки СППР, PHP [4] застосовується для формування запитів до бази даних MySQL, а також для організації розподілу доступу користувачів

відповідно до їхніх ролей. Також застосовано JavaScript [5] без використання фреймворків. Для візуального оформлення інтерфейсу використані стандартні засоби HTML [6] та CSS [7].

Інформаційно-реєстраційна частина системи підтримки прийняття рішень «Decisioner» створена за допомогою CMS WordPress [8].

На основі отриманих даних можна зробити висновок, що на сьогодні впевненим лідером серед CMS є WordPress. Також разом з CMS WordPress використані додаткові плагіни, серед яких можна виділити наступні. Плагін XYZ PHP Code призначений для створення сніпетів, що застосовуються для варіативного відображення сторінок [9]. Плагіни All-in-One WP Migration [10] і Duplicator [11] використовуються для створення резервних копій сайту. Завдяки власним скриптам і плагінам Registration Magic [12] та ProfileGrid [13] у системі налаштовано функціонал відкладеної реєстрації з автоматичним надсиланням сповіщень на електронні адреси адміністратора та користувача.

Для оформлення математичних формул у проєкті використано мову розмітки LaTeX [14]. Частина системи підтримки прийняття рішень, у якій реалізовані методи прийняття рішень, оформлено за допомогою Bootstrap [15].

Для інтерактивної взаємодії користувача з методами прийняття рішень застосовано бібліотеку jQuery [16]. Для візуалізації графіків використано бібліотеку amCharts [17] та Plotly [18].

Для написання коду проєкту використано Visual Studio Code (VS Code) [19]. Також були використані плагіни для VS Code: Prettier [20] – це інструмент для автоматичного форматування коду, що дотримується заданих стилістичних правил; PHP Tools [21] – інструмент, який розширює можливості середовища VS Code для програмування на мові PHP. Для розміщення СППР на хостингу використовувався FTP-клієнт FileZilla [22]. В якості сервера баз даних використано MySQL [23]. Для локальної розробки використано локальне серверне середовище MAMP [24].

СППР «Decisioner» надає можливість користувачам в онлайн режимі приймати рішення щодо вибору найкращої альтернативи за вказаними критеріями. Розроблена СППР складається з інформаційно-реєстраційної частини та

підсистеми ППР. Структуру бази даних СППР «Decisioner» наведено в Додатку Е. Інструкцію користувача та список реалізованих методів в СППР «Decisioner» наведено в Додатку Ж.

5.4 Модулі веб-орієнтованої СППР для розв'язання деяких задач багатокритеріального прийняття рішень

5.4.1 Модуль для розв'язання задачі визначення рівнів ризиків та їх пріоритетів комбінованим методом

Для прикладу розглянемо застосування СППР «Decisioner» для розв'язання задачі визначення рівнів ризиків ІТ-проєкту, пріоритетів та рангів цих ризиків у випадку, коли вхідні дані відповідають моделі (3.8), де:

- $A = \{A_1, A_2, A_3, A_4, A_5\}$ – множина ризиків ІТ-проєкту, A_1 – економічні ризики, A_2 – ринкові ризики, A_3 – ризик зміни вимог до ІТ-проєкту, A_4 – загрози в кібербезпеці, A_5 – ризики щодо якості програмного забезпечення;

- $C = \{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5\}$ – множина рівнів ризиків: C_1 – дуже низький рівень; C_2 – низький рівень; C_3 – середній рівень; C_4 – високий рівень; C_5 – дуже високий рівень;

- $K = \{K_1, K_2\}$ – множина критеріїв оцінювання ризиків, де K_1 – ймовірність виникнення ризику на ІТ-проєкті, K_2 – вплив ризику на ІТ-проєкт, при цьому критерії K_1, K_2 можуть бути нерівнозначними, тому їх порівняння за МАІ між собою проводиться за допомогою матриці парних порівнянь;

- $KM = (k_{ij})_{i=\overline{1,5}, j \in \{1,2\}}$ – матриця оцінок ризиків за критеріями K_1, K_2 , що задається у вигляді таблиці 3.3, де $k_{ij} \in (0; 1]$, при цьому множина значень ризиків ІТ-проєкту $R = \{R_1, R_2, \dots, R_5\}$ обраховуються у відповідності до наявних критеріїв за формулою (3.9).

Розроблений веб-ресурс надає можливість користувачу, як експерту, оцінити ймовірність виникнення ризиків та вплив ризиків на ІТ-проєкт за шкалою від 0 до 1. Користувач може додавати нові ризики, змінювати вже існуючі ризики, або

видаляти їх. Аналогічно можна додавати нові критерії щодо оцінювання ризиків, змінювати вже існуючі критерії, або видаляти їх.

На рис. 5.10 зображено сторінку веб-ресурсу при заданих ризиках та вхідних даних з оцінками ймовірності виникнення ризиків та впливу ризиків на ІТ-проект.

Risk Title		Add			
	Risk titles	Likelihood	Consequence	Action	
A1	Economic risks	0.70	0.25	Edit	Delete
A2	Market risks	0.15	0.60	Edit	Delete
A3	Risk of changing requirements	0.60	0.75	Edit	Delete
A4	Cybersecurity threats	0.75	0.85	Edit	Delete
A5	Software quality issues	0.90	0.55	Edit	Delete

Рисунок 5.10 – Приклад ризиків ІТ-проекту [розроблено автором]

На рис. 5.11 зображено вікно для введення критеріїв та їх порівняння за важливістю для ІТ-проекту.

Criteria

Add

Select Criteria Count: 2

K1	Likelihood	Edit	Delete
K2	Consequence	Edit	Delete

Determine the level of preference of likelihood or consequence:

Likelihood

Consequence

2 - A compromise between equal (1) and weak (3) importance of likelihood over consequence risks

Рисунок 5.11 – Введення критеріїв та їх порівняння за важливістю для ІТ-проекту в СППР «Decisioner» [розроблено автором]

На наступному кроці користувач може обрати множину рівнів ризиків C за допомогою шаблонів для 3, 5 та 9 рівнів ризику, або модифікувати їх під власний проект, зокрема змінити, видалити або додати власні рівні ризику (рис. 5.12). Щоб внести обрані рівні ризику для подальших обчислень необхідно натиснути на кнопку «Add Data».

Risk levels

<input style="width: 90%;" type="text" value="Risk Level"/> <input style="width: 10%;" type="button" value="Add"/>	Select Risk Level Count: 5
--	--

C1	Very low level of risk	<input type="button" value="Edit"/>	<input type="button" value="Delete"/>	<input type="button" value="Up"/>	<input type="button" value="Down"/>
C2	Low level of risk	<input type="button" value="Edit"/>	<input type="button" value="Delete"/>	<input type="button" value="Up"/>	<input type="button" value="Down"/>
C3	Medium level of risk	<input type="button" value="Edit"/>	<input type="button" value="Delete"/>	<input type="button" value="Up"/>	<input type="button" value="Down"/>
C4	High level of risk	<input type="button" value="Edit"/>	<input type="button" value="Delete"/>	<input type="button" value="Up"/>	<input type="button" value="Down"/>
C5	Very high level of risk	<input type="button" value="Edit"/>	<input type="button" value="Delete"/>	<input type="button" value="Up"/>	<input type="button" value="Down"/>

Рисунок 5.12 – Приклад використання шаблону на 5 рівнів ризиків ІТ-проекту
[розроблено автором]

На наступному кроці користувач або погоджується з результатами автоматичного обрахунку верхніх меж ризику r_j для кожного рівня ризику C_j ($j = \overline{1,5}$) (рис. 5.13), або визначає їх самостійно, при цьому веб-ресурс автоматично обраховує відсоток площі для кожної області ризиків S_j ($j = \overline{1,5}$) по відношенню до площі $S = 1$ квадрату $(0; 1] \times (0; 1]$ (області матриці ризиків).

Після натискання на кнопку «Process Data» на області матриці ризиків буде зображено наявні ризики як точки A_i з координатами (k_{i1}, k_{i2}) ($i = \overline{1,5}$) і кольором, що відповідає кольору рівня ризику (рис. 5.13).

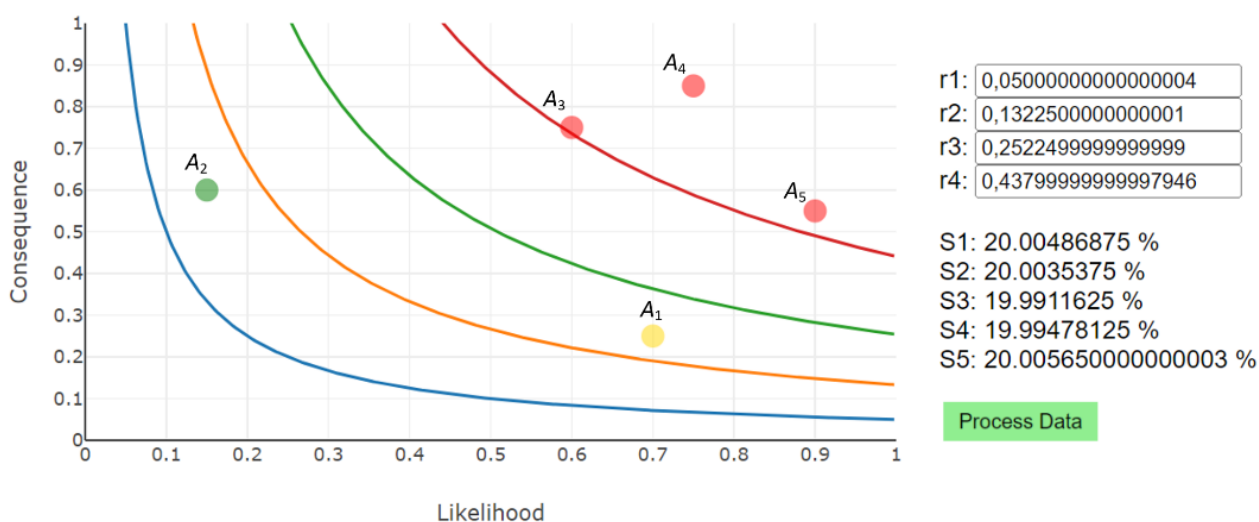


Рисунок 5.13 – Результат виконання класифікації ризиків ІТ-проекту за рівнями
[розроблено автором]

Далі веб-ресурс автоматично виконає обрахунки згідно з МАІ і виводить проміжні результати (рис. 5.14 та 5.15) у вигляді таблиць парного порівняння

ризиків за відповідними критеріями («Ймовірність», «Вплив»), вектор пріоритетів альтернатив $W^{(1)}$, $W^{(2)}$ та ранги ризиків $RR^{(1)}$, $RR^{(2)}$ за відповідним критерієм.

Pairwise comparisons by the criterion "Likelihood"

	Risk titles	A1	A2	A3	A4	A5
A1	Economic risks	1.0000	8.0000	1.0000	1.0000	0.5000
A2	Market risks	0.1250	1.0000	0.1250	0.1250	0.1250
A3	Risk of changing requirements	1.0000	8.0000	1.0000	0.5000	0.3333
A4	Cybersecurity threats	1.0000	8.0000	2.0000	1.0000	0.5000
A5	Software quality issues	2.0000	8.0000	3.0000	2.0000	1.0000
Lmax		CI		CR		
5.12470		0.03117		0.02759		

#	Risk priorities	Risk ranks
A1	0.20067	3
A2	0.02881	5
A3	0.16109	4
A4	0.23051	2
A5	0.37891	1

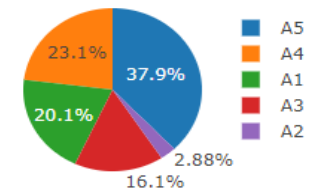


Рисунок 5.14 – Результат парного порівняння ризиків за критерієм «Ймовірність», вектор пріоритетів та їх ранги за цим критерієм [розроблено автором]

Pairwise comparisons by the criterion "Consequence"

	Risk titles	A1	A2	A3	A4	A5
A1	Economic risks	1.0000	0.1667	0.1429	0.1429	0.2000
A2	Market risks	6.0000	1.0000	0.5000	0.3333	1.0000
A3	Risk of changing requirements	7.0000	2.0000	1.0000	1.0000	3.0000
A4	Cybersecurity threats	7.0000	3.0000	1.0000	1.0000	4.0000
A5	Software quality issues	5.0000	1.0000	0.3333	0.2500	1.0000
Lmax		CI		CR		
5.11894		0.02974		0.02631		

#	Risk priorities	Risk ranks
A1	0.03519	5
A2	0.15130	3
A3	0.31951	2
A4	0.36702	1
A5	0.12700	4

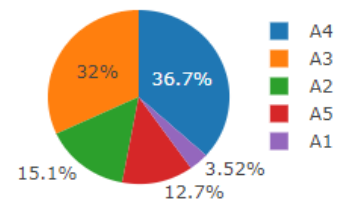


Рисунок 5.15 – Результат парного порівняння ризиків за критерієм «Вплив», вектор пріоритетів та їх ранги за цим критерієм [розроблено автором]

Підсумкові результати обчислень подаються у вигляді таблиці, де відображається наступна інформація: назви ризиків, значення ризиків, рівень ризиків за їх значеннями, вектор пріоритетів ризиків щодо їх впливу на ІТ-проект в цілому, ранги ризиків, які допоможуть користувачу визначити послідовність заходів щодо їх запобігання та усунення (рис. 5.16).

Risk levels and risk priorities

	Risk titles	Risk values	Risk levels	Risk priorities	Risk ranks
A1	Economic risks	0.17500	medium level of risk	0.14551	4
A2	Market risks	0.09000	low level of risk	0.06964	5
A3	Risk of changing requirements	0.45000	very high level of risk	0.21390	3
A4	Cybersecurity threats	0.63750	very high level of risk	0.27601	2
A5	Software quality issues	0.49500	very high level of risk	0.29494	1

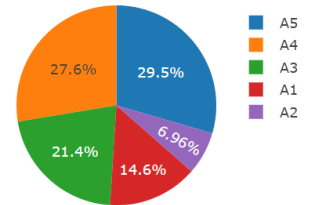


Рисунок 5.16 – Підсумкові результати з рівнями ризиків, значеннями пріоритетів та рангів ризиків ІТ-проєкту [розроблено автором]

У прикладі реалізовано випадок коли використовується компромісне рішення між однаковою (1) та слабкою (3) перевагою ймовірності виникнення ризиків над впливом ризиків на ІТ-проєкт (2) (див. рис. 5.11), тому до області дуже високих ризиків у відповідності до пріоритетів потрапляють ризики A_5 – ризики з якістю програмного забезпечення, A_4 – загрози в кібербезпеці, A_3 – ризик зміни вимог до ІТ-проєкту; до області середніх ризиків A_1 – економічні ризики; до області низьких ризиків A_2 – ринкові ризики (див. рис. 5.16).

З урахуванням вхідних даних прикладу і одержаних результатів, пропонується така послідовність організації заходів щодо запобігання та усунення існуючих ризиків: A_5 ($w^{(5)} = 0.29494$), A_4 ($w^{(4)} = 0.27601$), A_3 ($w^{(4)} = 0.2139$), A_1 ($w^{(1)} = 0.14551$), A_2 ($w^{(2)} = 0.06964$), при цьому доцільно скористатися одержаним реєстром ризиків ІТ-проєкту (рис. 4.40, 4.41).

Згенерований реєстр ризиків являє собою структуровану таблицю, в якій для кожного ризику ІТ-проєкту визначено відповідний перелік заходів щодо запобігання та усунення цих ризиків. Такий підхід дозволяє систематизувати ризики та пов'язані з ними управлінські дії, що сприяє підвищенню ефективності управління проєктними ризиками. Реєстр реалізовано таким чином, що забезпечується можливість його експорту у формат Excel за допомогою інтерактивної кнопки «Export to Excel». Це створює зручні умови для подальшої роботи з даними, їх аналізу та представлення у звичних форматах звітності.

На рисунку 5.17 представлено результуючий реєстр ризиків ІТ-проєкту, який є розширеною таблицею з детальним відображенням ключових параметрів ризиків, а також заходів їх запобігання та усунення.

Кожен ризик у реєстрі характеризується низкою показників, що дозволяють здійснити кількісну та якісну оцінку рівня ризику. Запропонований реєстр ризиків дозволяє системно відобразити ризики та відповідні превентивні заходи, що сприяє підвищенню ефективності управління ризиками на всіх етапах життєвого циклу ІТ-проєкту.

Result (risk register)								
Risk title	Risk value	Risk value norm	Risk value score	AHP weights	Mean weights	Mean weights score	Risk prevention	Risk elimination
Economic risks	0.17500	0.09472	medium level of risk	0.14551	0.16026	medium level of risk	<ul style="list-style-type: none"> - constant monitoring of the economic situation - budget reservation - active working capital management strategy - credit risk analysis - analysis of market trends and technological innovations - strategic planning - cost management - increasing the financial literacy of the staff - support of flexibility and adaptability in the organization - active participation in the business community and industry associations 	<ul style="list-style-type: none"> - replanning of the budget and reorganization of debt obligations - search for an additional source of funding - analysis of the causes of risk - reforming business strategy - diversification of business operations - review of contract terms - attracting additional funding - creation of additional reserves for further uncertainty - optimizing the use of resources, including human, financial and material resources - implementation of a strategy to restore the trust of customers, partners and investors
Market risks	0.09000	0.04871	low level of risk	0.06964	0.07982	low level of risk	<ul style="list-style-type: none"> - constant monitoring of the market - budget reservation - price fixation on a contractual basis - alternative base of customers/clients - diversification of the portfolio of products or services - analysis and forecasting of market trends for timely response to changes - thorough analysis of the competitive environment and reaction to competitors' actions - improvement of marketing strategies and processes - establishing partnerships with key customers and clients - continuous improvement of market risk management strategies and methods 	<ul style="list-style-type: none"> - replanning of the budget - selection of new customers/clients - finding and developing new products or services that can reduce dependence on specific markets or sectors - implementation of multi-directional marketing and advertising strategies to attract different audience segments and reduce risks associated with customer concentration in certain sectors or regions - implementation of a product or service portfolio diversification program - active work to increase customer loyalty and expand business relations with existing customers - development of a global expansion strategy to enter new markets and reduce exposure to regional or sectoral risks - engagement of consultants with experience in market risk management - activation of backup plans of the company - establishing control and monitoring systems to avoid similar risks in the future
Risk of changing requirements	0.45000	0.24357	very high level of risk	0.21390	0.33195	high level of risk	<ul style="list-style-type: none"> - clear definition of requirements - strategic planning - use of flexible development methodologies - regular stakeholder feedback and communication - establish effective control and monitoring mechanisms to timely identify and correct any non-compliance with the new requirements - investigate the possibilities of adapting the company's products or services, making the necessary changes to meet new requirements 	<ul style="list-style-type: none"> - analysis of requirements and risks - replanning of project stages - updating of documentation - carrying out open communication with clients, customers and other interested parties regarding the approval of changes in requirements and further actions of the company - ensuring constant monitoring of the situation and processes in order to respond in a timely manner to any further changes and improve the company's management system - implement flexibility in production and business processes to quickly respond to similar changes in the future
Cybersecurity threats	0.63750	0.34506	very high level of risk	0.27601	0.45676	very high level of risk	<ul style="list-style-type: none"> - regular risk assessments to identify potential vulnerabilities and threats to IT systems and data - employee training and awareness - strong authentication mechanisms - regular software updates and patch management - firewalls and intrusion detection/prevention systems - data encryption - access control - regular data backups - security monitoring and incident response - vendor security assessment - secure configuration management - continuous training and improvement of security, creation of cyber Security Operations Centers (SOC) 	<ul style="list-style-type: none"> - isolating and removing the threat - data restoration from backups - vulnerability review and security enhancement - incident analysis - staff awareness enhancement - continuous monitoring and follow-up - mitigation measures - computer forensic analysis - prevention of repeated incidents - real-time incident response planning and training - application of artificial intelligence and machine learning technologies - cooperation with third-party cyber security experts, CERT organizations
Software quality issues	0.49500	0.26793	very high level of risk	0.29494	0.39497	high level of risk	<ul style="list-style-type: none"> - define clear requirements - follow best code practices - conduct code review sessions - implementation and support of automated testing - continuous integration/continuous deployment (CI/CD) - static code analysis - performance testing - security testing - documentation and knowledge sharing - education and training of personnel - feedback loop 	<ul style="list-style-type: none"> - identify the root cause - determine the priority of issues - implement fixes - regression testing - automated testing - code reviews - continuous monitoring of the application - monitoring of user reviews - responding to error messages - documentation and knowledge sharing - continuous improvement

[Export to Excel](#)

Рисунок 5.17 – Результат заповнення реєстру ризиків [розроблено автором]

Особливість використання МАІ в даному прикладі полягає в тому, що в основу аналізу ризиків закладено незначна перевага ймовірності виникнення ризиків над впливом ризиків на ІТ-проєкт. Дану процедуру зробити стандартними засобами методу матриці ризиків досить складно, що доводить доцільність використання запропонованого комбінованого методу для управління ризиками проєктів.

Приклад заповнення засобів запобігання та усунення для ризиків в ІТ-проєктах, наведено в додатку Д «Засоби запобігання та усунення типових ризиків в ІТ-проєктах».

5.4.2 Модуль для розв’язання задачі тайм-менеджменту комбінованим методом

Вхідні дані до комбінованого методу розв’язування задачі тайм-менеджменту, що розв’язується за допомогою МАІ: *Мета* – короткий опис завдання, який становить перший рівень ієрархії; *Критерії* – кількісна або якісна характеристика, яка є істотною для судження про об’єкт (альтернативу). У випадку застосування матриці Ейзенхауера кількість критеріїв має дорівнювати 4 відповідно до назв квадрантів. Критерії складають другий рівень ієрархії; *Альтернативи* – об’єкти, серед яких необхідно зробити вибір, в нашому випадку це вхідні задачі для планування. Альтернативи складають третій рівень ієрархії. У СППР «Decisioner» можна задавати від 2 до 15 альтернатив. Причиною такого обмеження є те, що таблиця середніх значень індексу однорідності в МАІ містить значення тільки до матриці 15 розмірності [25, 26]. Розглянемо приклад, де за допомогою веб-інтерфейсу СППР «Decisioner» (рис. 5.18) вводяться необхідні задачі тайм-менеджменту в якості альтернатив, при цьому критерії введені автоматично у відповідності до методу матриці Ейзенхауера [27].

Комбінація методу аналізу ієрархій та матриці Ейзенхауера

для вирішення задачі необхідно ввести наступні вхідні дані:

МЕТА:

Розподілити заплановані задачі за ступенями важливості за методом матриці Ейзенхауера

#	Критерії
1	Важливі-термінові задачі
2	Важливі-нетермінові задачі
3	Неважливі-термінові задачі
4	Неважливі-нетермінові задачі

#	Альтернативи
1	Дописати модуль для програми
2	Провести тестування нового модуля
3	Оновити версію програми на сайті
4	Створити свій блог
5	Поділитись статтями в чаті
6	Відповісти на електронні листи
7	Відсортувати поштовий спам
8	Переглянути відеокурс з дизайну

- +

Рисунок 5.18 – Вхідні дані для задачі тайм-менеджменту в СППР «Decisioner»
[розроблено автором]

На кожному етапі попарних порівнянь за методом аналізу ієрархій автоматично обраховується значення узгодженості оцінок експерта. Відповідно до цього було створено поле для сповіщення користувача про значення відношення однорідності (BO).

У випадку допустимої узгодженості оцінок в цьому полі буде виведено повідомлення: «Матриця порівнянь узгоджена, оскільки $BO \leq 0.1$. Оцінки не потребують уточнення» (рис. 5.19).

Dim	Lmax	IO	BO
3.0000	3.0536	0.0268	0.0462

Правило транзитивності не порушено, оскільки $BO \leq 0.1$. Оцінки змін не потребують.

Рисунок 5.19 – Приклад сповіщення користувача про гарну узгодженість оцінок
[розроблено автором]

У протилежному випадку користувач отримає наступне повідомлення: «Матриця порівнянь погано узгоджена, оскільки $BO > 0.1$. Потрібно змінити оцінки порівняння» (рис. 5.20).

Dim	Lmax	IO	BO
3.0000	3.3674	0.1837	0.3168

Правило транзитивності порушено, оскільки $BO > 0.1$. Будь ласка, змініть ваші оцінки.

Рисунок 5.20 – Приклад сповіщення користувача про погану узгодженість оцінок
[розроблено автором]

Оскільки критерії у поставленій задачі між собою є рівнозначними, то їх порівняння не проводиться. Тому на наступному кроці проводиться порівняння альтернатив за критерієм k_1 – важливі-термінові задачі (рис. 4.46).

Приклад порівняння вхідних задач за відповідністю до класу k_1 «Важливі-термінові задачі» продемонстровано на рисунку 5.21.

За результатами порівняння задач між собою за критерієм «Важливі-термінові задачі» (рис. 5.21), такими задачами виявились «Дописати модуль для програми» та «Провести тестування нового модуля», оскільки їх ваги $w(a_j^{(1)}) \geq Q=0.25$. Відповідно, ці задачі в наступних порівняннях не будуть залучені.

#	Дописати модуль для програми	Провести тестування нового модуля	Оновити версію програми на сайті	Створити свій блог	Поділитись статтями в чаті	Відповісти на електронні листи	Відсортувати поштовий спам	Переглянути відеокурс з дизайну
Дописати модуль для програми	1	2	4	6	7	7	9	8
Провести тестування нового модуля	1/2	1	3	5	6	7	9	8
Оновити версію програми на сайті	1/4	1/3	1	5	3	2	7	5
Створити свій блог	1/6	1/5	1/5	1	2	1/3	5	3
Поділитись статтями в чаті	1/7	1/6	1/3	1/2	1	1/2	4	3
Відповісти на електронні листи	1/7	1/7	1/2	3	2	1	3	3
Відсортувати поштовий спам	1/9	1/9	1/7	1/5	1/4	1/3	1	1/3
Переглянути відеокурс з дизайну	1/8	1/8	1/5	1/3	1/3	1/3	3	1

#	Вага
Дописати модуль для програми	0.3566
Провести тестування нового модуля	0.2774
Оновити версію програми на сайті	0.1385
Створити свій блог	0.0564
Поділитись статтями в чаті	0.0496
Відповісти на електронні листи	0.0735
Відсортувати поштовий спам	0.0187
Переглянути відеокурс з дизайну	0.0293

Dim	Lmax	IO	BO
8.0000	8.6016	0.0859	0.0610

Правило транзитивності не порушено, оскільки $BO \leq 0.1$. Оцінки змін не потребують.

Рисунок 5.21 – Порівняння альтернатив за критерієм k_1 [розроблено автором]

За допомогою обрахованих ваг виокремлюються пріоритетні задачі для виконання в кожному квадраті Ейзенхауера, що, в свою чергу, дає розуміння важливості задач.

В даному випадку задача «Дописати модуль для програми» має більший пріоритет ($w(a_1^{(1)}) = 0.3566$) у виконанні над задачею «Провести тестування нового модуля» ($w(a_2^{(1)}) = 0.2774$), тому її виконання – першочергове.

На наступному кроці проводиться порівняння альтернатив, які залишилися, за критерієм k_2 – важливі-нетермінові задачі (рис. 5.22).

#	Оновити версію програми на сайті	Створити свій блог	Поділитись статтями в чаті	Відповісти на електронні листи	Відсортувати поштовий спам	Переглянути відеокурс з дизайну
Оновити версію програми на сайті	1	3	3	6	8	7
Створити свій блог	1/3	1	5	6	3	5
Поділитись статтями в чаті	1/3	1/5	1	1/2	1	2
Відповісти на електронні листи	1/6	1/6	2	1	2	2
Відсортувати поштовий спам	1/8	1/3	1	1/2	1	3
Переглянути відеокурс з дизайну	1/7	1/5	1/2	1/2	1/3	1

#	Вара
Оновити версію програми на сайті	0.4464
Створити свій блог	0.2706
Поділитись статтями в чаті	0.0748
Відповісти на електронні листи	0.0914
Відсортувати поштовий спам	0.0740
Переглянути відеокурс з дизайну	0.0429

Dim	Lmax	IO	BO
6.0000	6.5151	0.1030	0.0831

Правило транзитивності не порушено, оскільки $BO \leq 0.1$. Оцінки змін не потребують.

Рисунок 5.22 – Порівняння альтернатив за критерієм k_2 [розроблено автором]

За результатами порівняння задач між собою за критерієм «Важливі-нетермінові задачі», такими задачами із відповідними вагами виявились «Оновити версію програми на сайті» ($w(a_1^{(2)}) = 0.4464$) та «Створити свій блог» ($w(a_2^{(2)}) = 0.2706$). На наступному кроці проводиться порівняння альтернатив, які залишились, за критерієм k_3 – неважливі-термінові задачі (рис. 5.23).

#	Поділитись статтями в чаті	Відповісти на електронні листи	Відсортувати поштовий спам	Переглянути відеокурс з дизайну
Поділитись статтями в чаті	1	3	5	7
Відповісти на електронні листи	1/3	1	3	5
Відсортувати поштовий спам	1/5	1/3	1	3
Переглянути відеокурс з дизайну	1/7	1/5	1/3	1

#	Вара
Поділитись статтями в чаті	0.5638
Відповісти на електронні листи	0.2634
Відсортувати поштовий спам	0.1178
Переглянути відеокурс з дизайну	0.0550

Dim	Lmax	IO	BO
4.0000	4.1187	0.0396	0.0440

Правило транзитивності не порушено, оскільки $BO \leq 0.1$. Оцінки змін не потребують.

Рисунок 5.23 – Порівняння альтернатив за критерієм k_3 [розроблено автором]

За результатами порівняння задач між собою за критерієм «Неважливі-термінові задачі», такими задачами із відповідними вагами виявились «Поділитись статтями в чаті» ($w(a_1^{(3)})=0.5638$) та «Відповісти на електронні листи» ($w(a_2^{(3)})=0.2634$).

Відповідно, в списку задач залишаються ще дві задачі. У випадку коли на певному кроці залишається тільки одна задача – вона автоматично потрапляє в наступну категорію задач k_4 – неважливі-нетермінові задачі. У випадку, коли залишається більше однієї задачі, – можна не проводити порівняння задач за критерієм k_4 і залишити матрицю заповненою одиницями. Або можна провести порівняння цих задач для визначення їх пріоритету в послідовності виконання (рис. 5.24).

#	Відсортувати поштовий спам	Переглянути відеокурс з дизайну
Відсортувати поштовий спам	1	1/4
Переглянути відеокурс з дизайну	4	1

#	Вага
Відсортувати поштовий спам	0.2000
Переглянути відеокурс з дизайну	0.8000

Dim	Lmax	IO	BO
2.0000	2.0000	0.0000	

Правило транзитивності не порушено, оскільки $BO \leq 0.1$. Оцінки змін не потребують.

Рисунок 5.24 – Порівняння альтернатив за критерієм k_4 [розроблено автором]

За допомогою обрахованих ваг виокремлюються пріоритетні задачі для виконання в квадраті Ейзенхауера «Неважливі-нетермінові», що, в свою чергу, дає розуміння важливості задач. В даному випадку задача «Переглянути відеокурс з дизайну» має більший пріоритет ($w(a_1^{(4)})=0.8$) у виконанні над задачею «Відсортувати поштовий спам» ($w(a_1^{(4)})=0.2$), тому її виконання – першочергове.

За допомогою створеного веб-ресурсу користувач (ОПР, експерт) вводить у запропонований шаблон перелік необхідних задач в якості альтернатив, при цьому критерії з множини K вже введені до шаблону у відповідності до методу матриці Ейзенхауера. Далі, після поетапного заповнення матриць порівнянь альтернатив

для відповідних критеріїв, користувач одержить заповнену матрицю Ейзенхауера із зазначенням пріоритету задач у кожному класі (рис. 5.25).

Важливі-термінові		Важливі-нетермінові	
Задача	Вага	Задача	Вага
Дописати модуль для програми	0.3566	Оновити версію програми на сайті	0.4464
Провести тестування нового модуля	0.2774	Створити свій блог	0.2706
Неважливі-термінові		Неважливі-нетермінові	
Задача	Вага	Задача	Вага
Поділитись статтями в чаті	0.5638	Переглянути відеокурс з дизайну	0.8000
Відповісти на електронні листи	0.2634	Відсортувати поштовий спам	0.2000

Рисунок 5.25 – Заповнена матриця Ейзенхауера за допомогою СППР «Decisioner»
[розроблено автором]

У результаті дослідження було запропоновано комбінований метод для класифікації задач тайм-менеджменту, що поєднує в собі метод аналізу ієрархії та метод матриці Ейзенхауера, а також створено модуль для веб-орієнтованої системи підтримки прийняття рішень, що забезпечує в режимі онлайн автоматизацію процесу класифікації вхідних задач до матриці Ейзенхауера за ступенями важливості та пріоритетності виконання.

Отримані експериментальні результати підтверджують доцільність використання розробленого підходу до класифікації задач тайм-менеджменту, що використовує поєднання методу матриці Ейзенхауера та методу аналізу ієрархій.

Запропонований та досліджений метод доцільно застосовувати у випадку, коли необхідні числові обрахунки в якості підтвердження результату аналізу задач, або коли потрібно проаналізувати відносно рівнозначні між собою задачі, при оцінюванні яких потрібно математично обґрунтувати послідовність їх виконання.

5.4.3 Модуль для розв’язання задачі багатокритеріального прийняття рішень модифікованим методом Fuzzy TOPSIS

Практичне застосування розробленої інформаційної технології та модифікованого методу Fuzzy TOPSIS продемонстроване на задачі вибору

стандарту для управління ризиками в ІТ-проєктах на основі їх аналізу, наведеного в авторській статті [28]. Нехай ОПР необхідно визначити найбільш ефективний стандарт управління ризиками, що буде використовувати ІТ-компанія, з таких альтернатив: A_1 – використання ISO 31000 (International Organization for Standardization); A_2 – використання NIST 800-53 (National Institute of Standards and Technology); A_3 – використання PMBOK (Project Management Body of Knowledge).

При цьому пропонується керуватись такими критеріями C_j оцінювання ефективності вибору стандарту управління ризиками ($j = \overline{1,8}$):

- C_1 – кількість країн, що застосовують стандарт (вимірюється у кількості і яку потрібно максимізувати);
- C_2 – вплив на кількість інцидентів/порушень (вимірюється у відсотках і який потрібно максимізувати);
- C_3 – вплив на продуктивність (вимірюється у відсотках і який потрібно максимізувати);
- C_4 – вплив на рівень задоволеності співробітників (вимірюється у відсотках і який потрібно максимізувати);
- C_5 – вплив на фінансові показники (вимірюється у відсотках і який потрібно максимізувати).
- C_6 – витрати на впровадження (вимірюється у тис.\$ і які потрібно мінімізувати);
- C_7 – час впровадження (вимірюється у місяцях і які потрібно мінімізувати);
- C_8 – кількість годин для навчання персоналу (вимірюється у годинах і які потрібно мінімізувати).

На основі проведеного аналізу стандартів управління ризиками було визначено лінгвістичні оцінки ваг критеріїв C_j ($j = \overline{1,8}$), а також для кожної альтернативи A_i ($i = \overline{1,3}$) за кожним критерієм C_j було визначено як чіткі значення та інтервали корисності, так і їх лінгвістичні оцінки, що наведені у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Оцінки різних стандартів управління ризиками для ІТ-проєкту за визначеними критеріями [розроблено автором]

#	C_1 (країни)	C_2 (%)	C_3 (%)	C_4 (%)	C_5 (%)	C_6 (тис.\$)	C_7 (місяці)	C_8 (години)
Вага критерію	Середній (М)	Високий (Н)	Високий (Н)	Високий (Н)	Дуже високий (VH)	Дуже високий (VH)	Високий (Н)	Середній (М)
min/max	max	max	max	max	max	min	min	min
A_1	100+ Дуже високий (VH)	10-30 Середній (М)	10-20 Високий (Н)	75-85 Високий (Н)	10-15 Середній (М)	5-20 Середній (М)	3-6 Середній (М)	20-40 Середній (М)
A_2	50+ Високий (Н)	20-40 Високий (Н)	15-25 Дуже високий (VH)	70-80 Високий (Н)	20-30 Дуже високий (VH)	50-150 Дуже високий (VH)	6-12 Високий (Н)	40-80 Високий (Н)
A_3	100+ Дуже високий (VH)	30-50 Високий (Н)	20-30 Дуже високий (VH)	80-90 Високий (Н)	15-20 Високий (Н)	20-100 Високий (Н)	6-12 Високий (Н)	40-60 Високий (Н)

Для визначення найкращої альтернативи серед стандартів управління ризиками ІТ-проєктів за визначеними критеріями спочатку проведемо розрахунки за модифікованим методом FTOPSIS за допомогою відповідного модуля *СППР* «*Decisioner*». На першому кроці відбувається заповнення мети поставленої задачі, альтернатив і критеріїв, як це було вже наведено на рисунку 5.18.

На наступному кроці потрібно обрати метрики та тип нечітких чисел для розрахунку наприклад так, як це наведено на рисунку 5.26.

Оберіть метрики для розрахунку:

☐ Евклідова метрика
☐ Манхетенська метрика
☐ Метрика Хеммінга
☐ Метрика Чебишева
☐ Метрика Мінковського при $p =$

3

Оберіть тип нечітких чисел:

☐ Трикутні нечіткі числа
☒ Трапецієвидні нечіткі числа

Розрахувати

Рисунок 5.26 – Обрання метрик та типу нечітких чисел для розрахунку [розроблено автором]

На наступному кроці експерту потрібно заповнити початкову матриці оцінок в форматі нечітких чисел. Для цього користувач може обрати один з вбудованих шаблонів лінгвістичних термів (ЛТ), зокрема для 3 та 5 ЛТ з перетином та без перетину. Також користувач може задати вручну лінгвістичні терми або модифікувати вже існуючі шаблони. Приклад задання 5 лінгвістичних термів трапецієвидних нечітких чисел наведено на рисунку 5.27 з відповідним графічним представленням на рисунку 5.28.

Оберіть кількість лінгвістичних термів або задайте їх вручну











5 лінгвістичних термів		
Лінгвістичний термін	Нечіткі трапецієвидні числа	Дії
Дуже низький (VL)	(1, 1, 2, 3)	 
Низький (L)	(2, 3, 4, 5)	 
Середній (M)	(4, 5, 6, 7)	 
Високий (H)	(6, 7, 8, 9)	 
Дуже високий (VH)	(8, 9, 10, 10)	 

Рисунок 5.27 – Інтерактивне задання лінгвістичних термів [розроблено автором]

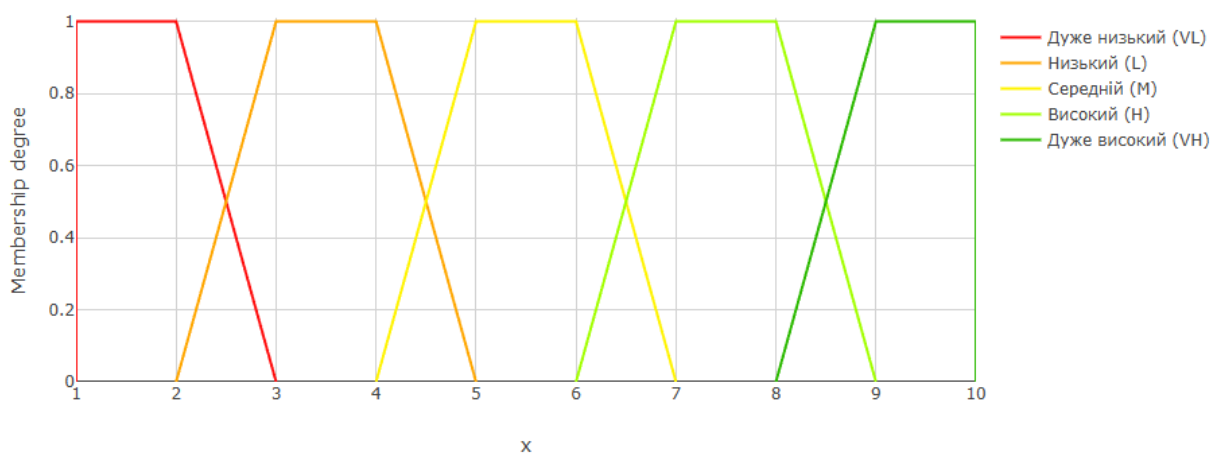


Рисунок 5.28 – Результат графічного представлення 5 лінгвістичних термів трапецієвидних НЧ [розроблено автором]

Лінгвістичні терми задано на основі даних таблиці 5.1 (рис. 5.29). Після підтвердження вхідних даних СППР автоматично обрахує нормалізовану нечітку

матрицю рішень $\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]$ виду (4.17)-(4.18) для трикутних НЧ, або виду (4.19)-(4.20) для трапецієвидних НЧ (рис. 5.30), зважену нормалізовану нечітку матрицю рішень $\tilde{V} = [\tilde{v}_{ij}]$ виду (4.21)-(4.23) (рис. 5.31).

Результат розрахунку найкращої альтернативи A^* з відображенням відстаней від кожної альтернативи A_i до FPIS (d_i^+) виду (4.26) та FNIS (d_i^-) виду (4.27) для обраних метрик, а також коефіцієнтів близькості CC_i^- виду (4.40) ($i = \overline{1,3}$), наведено на рисунку 5.32.

#	Кількість країн	Вплив на кількість інцидентів/ порушень	Вплив на продуктивність	Вплив на рівень задоволеності співробітників	Вплив на фінансові показники	Витрати на впровадження	Час впровадження	Кількість годин для навчання персоналу
min/max	max	max	max	max	max	min	min	min
Bara	M	H	H	H	VH	VH	H	M
ISO 31000	VH	M	H	H	M	M	M	M
NIST SP 800-53	H	H	VH	H	VH	VH	H	H
PMBOK	VH	H	VH	H	H	H	H	H

Рисунок 5.29 – Заповнення початкової матриці оцінок в форматі лінгвістичних термів [розроблено автором]

#	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
min/max	max	max	max	max	max	min	min	min
ISO 31000	0.8000	0.4444	0.6000	0.6667	0.4000	0.5714	0.5714	0.5714
	0.9000	0.5556	0.7000	0.7778	0.5000	0.6667	0.6667	0.6667
	1.0000	0.6667	0.8000	0.8889	0.6000	0.8000	0.8000	0.8000
	1.0000	0.7778	0.9000	1.0000	0.7000	1.0000	1.0000	1.0000
NIST SP 800-53	0.6000	0.6667	0.8000	0.6667	0.8000	0.4000	0.4444	0.4444
	0.7000	0.7778	0.9000	0.7778	0.9000	0.4000	0.5000	0.5000
	0.8000	0.8889	1.0000	0.8889	1.0000	0.4444	0.5714	0.5714
	0.9000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.5000	0.6667	0.6667
PMBOK	0.8000	0.6667	0.8000	0.6667	0.6000	0.4444	0.4444	0.4444
	0.9000	0.7778	0.9000	0.7778	0.7000	0.5000	0.5000	0.5000
	1.0000	0.8889	1.0000	0.8889	0.8000	0.5714	0.5714	0.5714
	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9000	0.6667	0.6667	0.6667

Рисунок 5.30 – Нормалізована нечітка матриця рішень для трапецієвидних НЧ [розроблено автором]

#	C1 (max)	C2 (max)	C3 (max)	C4 (max)	C5 (max)	C6 (min)	C7 (min)	C8 (min)
A1	3.2000	2.6667	3.6000	4.0000	3.2000	4.5714	3.4286	2.2857
	4.5000	3.8889	4.9000	5.4444	4.5000	6.0000	4.6667	3.3333
	6.0000	5.3333	6.4000	7.1111	6.0000	8.0000	6.4000	4.8000
	7.0000	7.0000	8.1000	9.0000	7.0000	10.0000	9.0000	7.0000
A2	2.4000	4.0000	4.8000	4.0000	6.4000	3.2000	2.6667	1.7778
	3.5000	5.4444	6.3000	5.4444	8.1000	3.6000	3.5000	2.5000
	4.8000	7.1111	8.0000	7.1111	10.0000	4.4444	4.5714	3.4286
	6.3000	9.0000	9.0000	9.0000	10.0000	5.0000	6.0000	4.6667
A3	3.2000	4.0000	4.8000	4.0000	4.8000	3.5556	2.6667	1.7778
	4.5000	5.4444	6.3000	5.4444	6.3000	4.5000	3.5000	2.5000
	6.0000	7.1111	8.0000	7.1111	8.0000	5.7143	4.5714	3.4286
	7.0000	9.0000	9.0000	9.0000	9.0000	6.6667	6.0000	4.6667
V+	3.2000	4.0000	4.8000	4.0000	6.4000	4.5714	3.4286	2.2857
	4.5000	5.4444	6.3000	5.4444	8.1000	6.0000	4.6667	3.3333
	6.0000	7.1111	8.0000	7.1111	10.0000	8.0000	6.4000	4.8000
	7.0000	9.0000	9.0000	9.0000	10.0000	10.0000	9.0000	7.0000
V-	2.4000	2.6667	3.6000	4.0000	3.2000	3.2000	2.6667	1.7778
	3.5000	3.8889	4.9000	5.4444	4.5000	3.6000	3.5000	2.5000
	4.8000	5.3333	6.4000	7.1111	6.0000	4.4444	4.5714	3.4286
	6.3000	7.0000	8.1000	9.0000	7.0000	5.0000	6.0000	4.6667

Рисунок 5.31 – Зважена нормалізована нечітка матриця рішень для трапецієвидних НЧ [розроблено автором]

Розрахунок	#	d_i^+	d_i^-	CC_i	Найкраща альтернатива A^*
Евклідова метрика	A1	7.4563	8.8192	0.5419	1
	A2	8.8192	7.4563	0.4581	3
	A3	8.2978	8.0161	0.4914	2
Мангеттенська метрика	A1	8.5222	9.2767	0.5212	1
	A2	9.2767	8.5222	0.4788	3
	A3	8.7794	9.0196	0.5067	2
Метрика Геммінга	A1	12.0000	16.0000	0.5714	1
	A2	16.0000	12.0000	0.4286	3
	A3	16.0000	20.0000	0.5556	2
Метрика Чебишова	A1	2.5333	3.8444	0.6028	1
	A2	3.8444	2.5333	0.3972	3
	A3	3.5556	2.8222	0.4425	2
Метрика Мінковського	A1	7.1764	9.0394	0.5574	1
	A2	9.0394	7.1764	0.4426	3
	A3	8.4769	7.7997	0.4792	2

Відповідь: Найкраща альтернатива відповідає варіанту з рейтингом "1"

Рисунок 5.32 – Результат розрахунку найкращої альтернативи для трапецієвидних НЧ [розроблено автором]

Виходячи з результатів, одержаних за методом FTOPSIS для різних метрик, кращим варіантом стандарту управління ризиками для ІТ-проектів з числа запропонованих альтернатив є ISO 31000 (альтернатива A_1) за всіма обраними метриками.

Наведемо результати експерименту щодо розв'язання поставленої задачі за допомогою різних модифікацій методу FTOPSIS і класичного методу TOPSIS з лінгвістичними оцінками ваг критеріїв:

- 1) FT3НЧ – FTOPSIS із застосуванням трикутних НЧ (див. рис. 4.1 а);
- 2) FT4НЧ – FTOPSIS із застосуванням трапецієвидних НЧ (див. рис. 4.1 б);
- 3) TFW3НЧ – TOPSIS з нечіткими трикутними числами для визначення ваг критеріїв;
- 4) TFW4НЧ – TOPSIS з нечіткими трапецієвидними числами для визначення ваг критеріїв.

У методах TFW3НЧ, TFW4НЧ для того, щоб спростити експертне оцінювання ваг критеріїв w_j , $j = \overline{1, M}$, які в сумі повинні дорівнювати одиниці, в класичному методі TOPSIS були використані лінгвістичні оцінки ваг кожного критерію C_j , яким відповідають нечіткі числа $\tilde{w}_j = (w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{jn})$, $j = \overline{1, M}$, де $n = 3$ для трикутних НЧ і $n = 4$ для трапецієвидних НЧ.

На рис. 5.33 зображено таблицю з вхідними даними задачі для методу TOPSIS з лінгвістичними оцінками ваг критеріїв, яким відповідають трапецієвидні НЧ (див. табл. 4.1).

#	Кількість країн	Вплив на кількість інцидентів/ порушень	Вплив на продуктивність	Вплив на рівень задоволеності співробітників	Вплив на фінансові показники	Витрати на впровадження	Час впровадження	Кількість годин для навчання персоналу
min/max	max	max	max	max	max	min	min	min
Варі	М	Н	Н	Н	ВН	ВН	Н	М

Рисунок 5.33 – Вхідні дані задачі для методу TOPSIS з лінгвістичними оцінками ваг критеріїв [розроблено автором]

На рис. 5.34 зображено таблицю з вхідними даними задачі для методу TOPSIS з нормалізованими оцінками ваг критеріїв за формулами (4.46)-(4.48) для $n = 4$.

#	Кількість країн	Вплив на кількість інцидентів/ порушень	Вплив на продуктивність	Вплив на рівень задоволеності співробітників	Вплив на фінансові показники	Витрати на впровадження	Час впровадження	Кількість годин для навчання персоналу
min/max	max	max	max	max	max	min	min	min
Bara	0.09243€	0.1260504€	0.12605042016€	0.1260504201€	0.1554621€	0.1554621848€	0.1260504201€	0.0924369
ISO 31000	100	20	15	80	12.5	12.5	4.5	30
NIST SP 800-53	50	30	20	75	25	100	9	60
PMBOK	100	40	25	85	17.5	60	9	50

Рисунок 5.34 – Вхідні дані задачі для методу TOPSIS з нормалізованими оцінками ваг критеріїв [розроблено автором]

Для наочного відображення відмінностей між результатами при застосуванні різних метрик та методів, було розраховано матрицю відхилень між результатами, одержаними різними методами за методикою описаною в формулах (4.49)-(4.50). Нехай M_1 – FT3НЧ, M_2 – FT4НЧ, M_3 – TFW3НЧ та M_4 – TFW4НЧ. Після проведення експерименту з розглянутими методами з різними метриками j ($j = \overline{1,5}$) для альтернатив A_i ($i = \overline{1,3}$), були отримані матриці E^q ($q = \overline{1,4}$) виду (4.49), подані на рис. 5.35.

FT3НЧ	E^1	Euclidean	Manhattan	Hamming	Chebyshev	Minkowski
	A1	0,5764	0,5387	0,5789	0,6261	0,5970
	A2	0,4236	0,4613	0,4211	0,3739	0,4030
	A3	0,4524	0,4787	0,5217	0,4062	0,4354
FT4НЧ	E^2	Euclidean	Manhattan	Hamming	Chebyshev	Minkowski
	A1	0,5419	0,5212	0,5714	0,6028	0,5574
	A2	0,4581	0,4788	0,4286	0,3972	0,4426
	A3	0,4914	0,5067	0,5556	0,4425	0,4792
TFW3НЧ	E^3	Euclidean	Manhattan	Hamming	Chebyshev	Minkowski
	A1	0,6087	0,6055	0,5556	0,6631	0,6250
	A2	0,3282	0,2690	0,3000	0,3369	0,3363
	A3	0,5103	0,5656	0,6364	0,4571	0,4936
TFW4НЧ	E^4	Euclidean	Manhattan	Hamming	Chebyshev	Minkowski
	A1	0,6119	0,6082	0,5556	0,6631	0,6282
	A2	0,3280	0,2689	0,3000	0,3369	0,3361
	A3	0,5083	0,5639	0,6364	0,4571	0,4914

Рисунок 5.35 – Результати методів у вигляді матриці E^{Mq} виду (4.49) [розроблено автором]

Матриці відхилень $D^{X,Y}$ виду (4.50) між результатами двох методів X і Y ($X = \overline{1,3}, Y = \overline{2,4}, X \neq Y$) подано на рис. 5.36.

FT3НЧ - FT4НЧ	$D^{1,2}$	Euclidean	Manhattan	Hamming	Chebyshev	Minkowski
	A1	0,0345	0,0175	0,0075	0,0234	0,0396
	A2	0,0345	0,0175	0,0075	0,0234	0,0396
	A3	0,0389	0,0280	0,0338	0,0363	0,0438
FT3НЧ - TFW3НЧ	$D^{1,3}$	Euclidean	Manhattan	Hamming	Chebyshev	Minkowski
	A1	0,0324	0,0667	0,0234	0,0370	0,0280
	A2	0,0955	0,1922	0,1211	0,0370	0,0667
	A3	0,0579	0,0868	0,1146	0,0509	0,0582
FT3НЧ - TFW4НЧ	$D^{1,4}$	Euclidean	Manhattan	Hamming	Chebyshev	Minkowski
	A1	0,0355	0,0694	0,0234	0,0370	0,0312
	A2	0,0957	0,1923	0,1211	0,0370	0,0669
	A3	0,0559	0,0851	0,1146	0,0509	0,0559
FT4НЧ - TFW3НЧ	$D^{2,3}$	Euclidean	Manhattan	Hamming	Chebyshev	Minkowski
	A1	0,0669	0,0843	0,0159	0,0603	0,0676
	A2	0,1300	0,2098	0,1286	0,0603	0,1063
	A3	0,0190	0,0588	0,0808	0,0146	0,0144
FT4НЧ - TFW4НЧ	$D^{2,4}$	Euclidean	Manhattan	Hamming	Chebyshev	Minkowski
	A1	0,0700	0,0870	0,0159	0,0603	0,0707
	A2	0,1302	0,2099	0,1286	0,0603	0,1064
	A3	0,0170	0,0571	0,0808	0,0146	0,0122
TFW3НЧ - TFW4НЧ	$D^{3,4}$	Euclidean	Manhattan	Hamming	Chebyshev	Minkowski
	A1	0,003134289	0,002700502	0	0	0,00311769
	A2	0,000179553	9,22555E-05	0	0	0,000158067
	A3	0,002005483	0,001686576	0	0	0,002290157

Рисунок 5.36 – Матриця відхилень $D^{X,Y}$ виду (4.50) між результатами методів
[розроблено автором]

Як зрозуміло з рисунку 5.36, відхилення розподіляються нерівномірно, що означає, що різні метрики реагують по-різному на ті самі вхідні дані.

Найменше відхилення між коефіцієнтами близькості отримано в матриці відхилень $D^{3,4}$, що свідчить про відсутність значної різниці у виборі типу нечітких чисел (трикутні або трапецієвидні НЧ) для визначення ваг критеріїв. Найбільше відхилення у $D^{3,4}$ становить 0.0027 у мангеттенській метриці.

Також незначні відхилення між коефіцієнтами близькості спостерігаються в матриці відхилень $D^{1,2}$. Отже, можна зробити висновок, що немає суттєвої різниці між використанням FTOPSIS із застосуванням трикутних та трапецієвидних НЧ. Найбільше відхилення у $D^{1,2}$ дорівнює 0.0438 у метриці Мінковського.

Порівняно значні відхилення між коефіцієнтами близькості отримано в матрицях відхилень $D^{1,3}$, $D^{1,4}$, $D^{2,3}$ та $D^{2,4}$. Зокрема, найбільші відхилення спостерігаються при застосуванні мангеттенської метрики (у середньому 0.2) для вищезазначених матриць відхилень. Це пов'язано з особливістю обчислення цієї

метрики. Найбільш стабільною метрикою в результаті проведених експериментів було визначено метрику Чебишова (рис. 5.36).

Запропонований підхід для порівняння результатів застосування різних методів надає можливість визначити які методи дають схожі, або різко відмінні результати. За цим підходом можна проаналізувати чи є масштаби відхилень значущими, або вони знаходяться в межах допустимої похибки. Також цей підхід для порівняння результатів застосування різних методів надає можливість оцінити якість роботи експертів, а саме – наскільки точно експертами проведена фазифікація реальних вхідних даних до задачі прийняття рішень.

Якщо потрібно обрати універсальну метрику, тоді доцільно використовувати метрики з мінімальними відхиленнями (наприклад, метрику Мінковського або Чебишова). Якщо ж важливо враховувати окремі максимальні відмінності між FPIS та FNIS, то мангетенська метрика може бути кращою.

Методи, що мають мінімальні відхилення між результатами, можуть використовуватись альтернативно, а методи, що мають значні відхилення між результатами, потребують додаткового аналізу з метою виявлення та пояснення причин отриманих розбіжностей.

Для порівняння результатів вибору найкращої альтернативи розглянуто матрицю порівняння рангів альтернатив (рис. 5.37).

FT 3-НЧ	Euclidean	Manhattan	Hamming	Chebyshev	Minkowski
A1	1	1	1	1	1
A2	3	3	3	3	3
A3	2	2	2	2	2
FT 4-НЧ	Euclidean	Manhattan	Hamming	Chebyshev	Minkowski
A1	1	1	1	1	1
A2	3	3	3	3	3
A3	2	2	2	2	2
T FW 3-НЧ	Euclidean	Manhattan	Hamming	Chebyshev	Minkowski
A1	1	1	2	1	1
A2	3	3	3	3	3
A3	2	2	1	2	2
T FW 4-НЧ	Euclidean	Manhattan	Hamming	Chebyshev	Minkowski
A1	1	1	2	1	1
A2	3	3	3	3	3
A3	2	2	1	2	2

Рисунок 5.37 – Матриця порівняння рангів альтернатив [розроблено автором]

За результатами застосування методів FT3НЧ, FT4НЧ, TFW3НЧ, TFW4НЧ з різними метриками (рис. 5.37) було встановлено, що кращим варіантом стандарту управління ризиками для ІТ-проектів, з числа запропонованих альтернатив, є ISO 31000 (альтернатива A_1).

5.4.4 Модуль для розв'язання задачі багатокритеріального прийняття рішень декількома методами з агрегуванням результатів

Припустимо, що керівник ІТ-компанії, як особа що приймає рішення (ОПР), планує розпочати новий ІТ-проект. Відповідно до цього він повинен зробити вибір з кількох варіантів замовлень від замовників, які представлено множиною альтернатив $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, керуючись при цьому множиною критеріїв $K = \{k_1, k_2, \dots, k_m\}$, що або мінімізуються, або максимізуються в залежності від їх змісту. Від заданих критеріїв залежить успіх реалізації ІТ-проекту [29].

Керівник може використовувати для пошуку фріланс проекту відповідні сайти, наприклад, Upwork [30] – для роботи на іноземному ринку праці, Freelancehunt [31] – для роботи на фріланс ринку праці України. Для прикладу, при формуванні критеріїв використані типові дані щодо замовлення з фріланс-біржі Freelancehunt.

При цьому ОПР може керуватися, наприклад, такими критеріями оцінювання привабливості проекту, як: k_1 – вартість виконання (необхідно максимізувати), k_2 – терміни виконання (вимірюється в днях; необхідно мінімізувати), k_3 – кількість позитивних відгуків про замовника (необхідно максимізувати), k_4 – кількість негативних відгуків про замовника (необхідно мінімізувати), k_5 – загальна оцінка профіля замовника (рейтинг замовника; необхідно максимізувати), k_6 – досвід роботи замовника на платформі (вимірюється в роках; необхідно максимізувати), k_7 – коефіцієнт успішного завершення проектів замовником (розраховується за співвідношенням закриті проекти/відкриті проекти; вимірюється за шкалою від 0 до 1; необхідно максимізувати), k_8 – складність завдання (вимірюється у відносній

шкалі від 1 до 9; необхідно мінімізувати), k_9 – обізнаність команди щодо технологій (вимірюється у відносній шкалі від 1 до 9; необхідно максимізувати).

Шляхом експертного оцінювання критерії визначені як рівнозначні між собою. Кількісні оцінки задаються фактично на основі характеристик анкети проєкту за критеріями $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7$. Якісні оцінки задаються шляхом експертного оцінювання за критеріями k_8 і k_9 .

Необхідно зробити вибір з трьох варіантів замовлень від потенційних замовників: A_1, A_2, A_3 .

Проект 1 (A_1). Розробка медичної інформаційної системи.

Стек технологій: Angular 9, Angular Material, Node.js, MongoDB.

Проект 2 (A_2). Створення інтернет-магазину.

Стек технологій: MERN (MongoDB, Express.js, React.js, Node.js), AWS.

Проект 3 (A_3). Доопрацювання проєкту в сфері туризму.

Стек технологій: Python, Django, Wagtail.

Таблиця 5.2 – Результат заповнення початкової матриці [розроблено автором]

Альтернативи	Критерії								
	k_1 (max) тис. грн	k_2 (min) дні	k_3 (max) к-сть	k_4 (min) к-сть	k_5 (max) к-сть	k_6 (max) роки	k_7 (max) 0-1	k_8 (min) 1-9	k_9 (max) 1-9
A_1	50	70	8	1	1532	5	0.49	8	8
A_2	25	30	5	3	523	3	0.75	6	7
A_3	5	7	4	0	128	1	0.9	4	6

В таблиці 5.2 задані вхідні дані в яких одночасно поставлена задача максимізації та мінімізації певних критеріїв. Методи прийняття рішень в умовах невизначеності та ризику не підходить для розв'язання даної задачі, оскільки передбачають використання вхідної матриці лише одного з двох типів – матриці вигравів або матриці програшів. Відповідно, розв'яжемо задану задачу за допомогою методів АНР, MOORA, TOPSIS, FTOPSIS. При цьому, АНР дозволяє враховувати експертні оцінки при побудові ієрархій критеріїв, MOORA – ефективно нормалізує дані та дозволяє працювати з великою кількістю

альтернатив, тоді як TOPSIS забезпечує інтуїтивно зрозумілу інтерпретацію результатів шляхом порівняння з ідеальними рішеннями. Додатково, застосування FUZZY TOPSIS дозволяє розширити можливості класичного TOPSIS за рахунок нечітких оцінок, що є важливим у випадках, коли дані носять суб'єктивний або якісний характер, а точні числові значення складно визначити.

В свою чергу, використання методів АНР та ANP для порівняння результатів в межах однієї задачі є методологічно недоцільним через різницю в структурних припущеннях обох методів. У класичній задачі АНР вплив мети на критерії, а критеріїв – на альтернативи відповідає ієрархічній структурі без зворотних зв'язків. У цьому випадку взаємодії між елементами відбуваються лише зверху вниз (від мети до альтернатив), що повністю відповідає методу АНР. Відповідно, застосування ANP у такій структурі не дасть суттєво відмінного результату, оскільки мережеві зв'язки, які враховує ANP, фактично відсутні – структура і без того ієрархічна. Це призведе до аналогічних результатів, оскільки матриця впливів у ANP набуде структури, близької до ієрархічної, що підпадає під модель АНР.

З іншого боку, спроба врахувати додаткові впливи (наприклад, взаємозалежності між критеріями чи альтернативами) для повноцінного застосування ANP призведе до зміни вихідної структури задачі. Включення таких впливів означає модифікацію моделі, що змінює зміст задачі порівняно з початковою ієрархічною постановкою. Як наслідок, результати, отримані АНР та ANP, будуть сформовані на основі різних моделей. Це робить їх некоректними для прямого порівняння, оскільки відображають різні структурні припущення через взаємозв'язки між елементами моделі.

Водночас, кожен з методів може бути доцільно використаний окремо у комбінації з іншими методами прийняття рішень (наприклад, TOPSIS, MOORA тощо), коли метою є перевірка стабільності рішень або проведення порівняльного аналізу за різними підходами. У таких випадках застосування методів АНР або ANP є доречним, оскільки вони використовуються незалежно, а не для прямого порівняння між собою в межах однієї і тієї ж моделі.

Таким чином, одночасне застосування АНР та АНР для порівняння результатів однієї задачі є методологічно необґрунтованим, проте їх окреме використання з іншими методами є ефективним інструментом багатокритеріального аналізу.

В СППР «Decisioner» є можливість одночасного розв’язку однієї задачі (рис. 5.38) за допомогою методу аналізу ієрархій (АНР); методу аналізу співвідношень (MOORA); методу порядку переваги за подібністю до ідеального рішення (TOPSIS); нечіткого методу порядку переваги за подібністю до ідеального рішення (FTOPSIS); методу прийняття рішень в умовах повної невизначеності (ПРУПН) та методу аналітичних мереж (АНР).

Оберіть методи для розрахунку:

- ☒ Метод аналізу ієрархій (АНР)
- ☒ Метод аналізу співвідношень (MOORA)
- ☒ Метод порядку переваги за подібністю до ідеального рішення (TOPSIS)
- ☒ Нечіткий метод порядку переваги за подібністю до ідеального рішення (Fuzzy TOPSIS)
- ☐ Прийняття рішень в умовах повної невизначеності (ПРУПН)
- ☐ Прийняття рішень в умовах ризику (ПРУР)
- ☐ Метод аналітичних мереж (АНР)

Оберіть тип задання вагових коефіцієнтів для агрегації результатів обраних методів:

- ☐ Виставлення вагових коефіцієнтів вручну
- ☒ Парне порівняння за методом аналізу ієрархій
- ☐ Без вагових коефіцієнтів із застосуванням середнього геометричного

Рисунок 5.38 – Вибір методів для розрахунку та типу задання вагових коефіцієнтів для агрегування результатів обраних методів [розроблено автором]

Також є можливість обрати тип задання вагових коефіцієнтів для агрегування результатів обраних методів, серед яких: виставлення коефіцієнтів вручну (рис. 5.39); парне порівняння за методом аналізу ієрархій (рис. 5.40); без вагових коефіцієнтів із застосуванням середнього геометричного.

Метод прийняття рішень в умовах ризику не було включено до списку методів, що використовуються для одночасного розв’язання однієї задачі (рис. 1), оскільки під час експериментальних досліджень було виявлено нестабільність отриманих результатів. Водночас цей метод може бути застосований окремо за

потреби, що підтверджує доцільність модульного підходу, реалізованого у розробленій системі підтримки прийняття рішень.

На рисунку 5.39 продемонстровано результат задання вагових коефіцієнтів для агрегування результатів обраних методів вручну.

Метод	Вара
Метод аналізу ієрархій (AHP)	0.4
Метод аналізу співвідношень (MOORA)	0.15
Метод порядку переваги за подібністю до ідеального рішення (TOPSIS)	0.15
Нечіткий метод порядку переваги за подібністю до ідеального рішення (FTOPSIS)	0.3

Рисунок 5.39 – Результат задання вагових коефіцієнтів для агрегування результатів обраних методів вручну [розроблено автором]

На рисунку 5.40 продемонстровано результат задання вагових коефіцієнтів для агрегування результатів обраних методів за допомогою парних порівнянь за методом аналізу ієрархій. Для подальшого розв’язку та результатів використано цей варіант агрегування результатів обраних методів.

#	AHP	MOORA	TOPSIS	FTOPSIS	#	Вара
AHP	1	3	3	2	AHP	0.4393
MOORA	1/3	1	1/2	1/3	MOORA	0.1036
TOPSIS	1/3	2	1	1/3	TOPSIS	0.1464
FTOPSIS	1/2	3	3	1	FTOPSIS	0.3107

Dim	Lmax	IO	BO
4.0000	4.1213	0.0404	0.0449

Матриця порівнянь узгоджена, оскільки $BO \leq 0.1$. Оцінки не потребують уточнення.

Рисунок 5.40 – Результат задання вагових коефіцієнтів для агрегування результатів обраних методів за допомогою парних порівнянь за методом аналізу ієрархій [розроблено автором]

Після задання вагових коефіцієнтів користувач у інтерактивному режимі послідовно виконує етапи розв’язання задачі відповідно до обраних методів.

Розв’язок задачі за допомогою методу АНР за умови рівнозначності критеріїв наведено на рисунку 5.41.

#	Альтернативи	Вага
1	A1	0.405
2	A2	0.226
3	A3	0.368

JS chart by amCharts

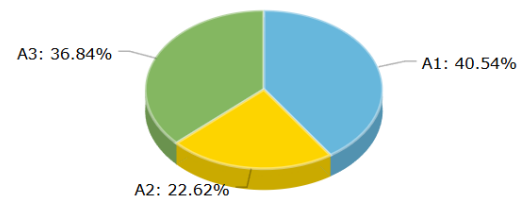


Рисунок 5.41 – Розв’язок задачі за допомогою методу АНР [розроблено автором]

Згідно з вектором пріоритетів, наведеним на рисунку 4.86, найвищу пріоритетність має проєкт A_1 – «Розробка медичної інформаційної системи», із значенням пріоритету 0.405, що свідчить про його перевагу над іншими альтернативами.

На рис. 5.42 наведено розв’язок задачі за допомогою методу MOORA.

#	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	Вектор суми відхилень	Ранг альтернатив
min/max	max	min	max	min	max	max	max	min	max		
A1	0.000	0.824	0.000	0.316	0.000	0.000	0.323	0.371	0.000	1.834	1
A2	0.445	0.301	0.293	0.949	0.621	0.338	0.118	0.186	0.082	3.333	3
A3	0.802	0.000	0.390	0.000	0.865	0.676	0.000	0.000	0.164	2.897	2

Відповідь: Найкраща альтернатива відповідає варіанту з рейтингом "1"

Рисунок 5.42 – Розв’язок задачі за допомогою методу MOORA [розроблено автором]

Згідно з вектором суми відхилень, наведеним на рисунку 5.42, найнижче значення має проєкт A_1 – «Розробка медичної інформаційної системи», із значенням 1.834, що свідчить про його перевагу над іншими альтернативами.

На рис. 5.43 наведено розв’язок задачі за допомогою методу TOPSIS за умови рівної важливості критеріїв за евклідовою метрикою для розрахунку коефіцієнта близькості.

#	K1 (max)	K2 (min)	K3 (max)	K4 (min)	K5 (max)	K6 (max)	K7 (max)	K8 (min)	K9 (max)	d+	d-	CCI	Ранг альтернатив
A1	0.0990	0.1017	0.0867	0.0351	0.1048	0.0939	0.0429	0.0825	0.0728	0.1122	0.1731	0.6066	1
A2	0.0495	0.0436	0.0542	0.1054	0.0358	0.0563	0.0656	0.0619	0.0637	0.1503	0.0907	0.3764	3
A3	0.0099	0.0102	0.0434	0.0000	0.0088	0.0188	0.0787	0.0413	0.0546	0.1582	0.1499	0.4866	2
V+	0.0990	0.0102	0.0867	0.0000	0.1048	0.0939	0.0787	0.0413	0.0728				
V-	0.0099	0.1017	0.0434	0.1054	0.0088	0.0188	0.0429	0.0825	0.0546				

Відповідь: Найкраща альтернатива відповідає варіанту з рейтингом "1"

Рисунок 5.43 – Розв’язок задачі за допомогою методу TOPSIS [розроблено автором]

На основі результатів, отриманих за методом TOPSIS (рис. 5.43), найкращою альтернативою серед розглянутих варіантів є проєкт A_1 – «Розробка медичної інформаційної системи», який має найвище значення коефіцієнта близькості до ідеального розв’язку – 0.6066.

Розв’язок задачі за допомогою методу FTOPSIS з трапецієвидними нечіткими числами за евклідовою метрикою для розрахунку коефіцієнта близькості наведено на рисунку 5.44.

Розрахунок	#	d_i^+	d_i^-	CC_i^-	Найкраща альтернатива A^*
Евклідова метрика	A1	11.7547	13.5023	0.5346	1
	A2	15.3206	9.9329	0.3933	3
	A3	12.3580	12.8284	0.5093	2

Рисунок 5.44 – Результат розрахунку найкращої альтернативи за допомогою методу FTOPSIS [розроблено автором]

На основі результатів, отриманих за методом FTOPSIS (рис. 5.44), найкращою альтернативою серед розглянутих варіантів є проєкт A_1 – «Розробка медичної інформаційної системи», який має найвище значення коефіцієнта близькості до ідеального розв’язку – 0.5346.

Для агрегування результатів методів було застосовано вагові коефіцієнти, отримані за допомогою парних порівнянь за методом аналізу ієрархій. Результат агрегування результатів методів наведено на рис. 5.45.

#	Альтернативи	Вара
1	A1	0.39673
2	A2	0.24537
3	A3	0.35746

JS chart by amCharts

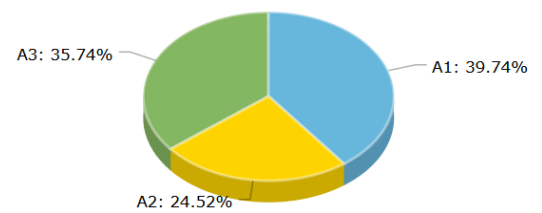


Рисунок 5.45 – Результат агрегування декількох методів [розроблено автором]

На основі агрегування результатів методів АНП, MOORA, TOPSIS, FTOPSIS (рис. 5.44), найкращою альтернативою серед розглянутих варіантів є проєкт A_1 – «Розробка медичної інформаційної системи», який має найвище значення коефіцієнта близькості до ідеального розв’язку – 0.39673.

Для наочного відображення відмінностей між результатами при застосуванні різних методів, було розраховано матрицю відхилень між результатами, одержаними різними методами за методикою описаною в формулах (2.25)-(2.26).

Нехай маємо M_1 – АНП, M_2 – MOORA, M_3 – TOPSIS, M_4 – FTOPSIS. Після проведення експерименту з розглянутими методами для альтернатив A_i ($i = \overline{1,3}$), були отримані вектори V^q ($q = \overline{1,4}$) виду (2.24). Оскільки в методі MOORA найкращою вважається альтернатива з найменшим значенням вектором суми відхилень, то необхідно відсортувати нормалізовані значення наступним чином, як це продемонстровано на рис. 5.46.

	A1	A2	A3
АНП	0.405	0.226	0.368
MOORA	0.413	0.227	0.359
TOPSIS	0.413	0.256	0.331
FTOPSIS	0.372	0.274	0.354

Рисунок 5.46 – Нормалізовані результати методу АНП, MOORA TOPSIS

[розроблено автором]

Вектор відхилень $D^{X,Y}$ виду (2.25) між результатами двох методів X і Y ($X = \overline{1,3}, Y = \overline{2,4}, X \neq Y$) подано на рисунку 5.47.

	A1	A2	A3	mean
AHP - MOORA	0.008318452	0.001430556	0.008749008	0.006166005
AHP - TOPSIS	0.007765378	0.030124115	0.036889494	0.024926329
AHP - FTOPSIS	0.033045127	0.047664425	0.013619298	0.03144295
MOORA - TOPSIS	0.000553074	0.02869356	0.028140486	0.01912904
MOORA - FTOPSIS	0.041363579	0.046233869	0.00487029	0.030822579
TOPSIS - FTOPSIS	0.040810505	0.017540309	0.023270196	0.027207003

Рисунок 5.47 – Матриця відхилень D між результатами методів АНП, MOORA, TOPSIS, FTOPSIS [розроблено автором]

Як видно з рисунку 5.47, відхилення результатів застосування методів являються незначними. Найбільше значення відхилення векторами пріоритетів спостерігається при порівнянні результатів АНП та FTOPSIS, що в середньому для трьох альтернатив складає 0.03144. Найменше значення відхилення між векторами пріоритетів можна побачити при порівнянні результатів АНП та MOORA, що в середньому для трьох альтернатив складає 0.00617.

Для порівняння результатів вибору найкращої альтернативи розглянуто матрицю порівняння рангів альтернатив (рис. 5.48).

	AHP	MOORA	TOPSIS	FTOPSIS
A1	1	1	1	1
A2	3	3	3	3
A3	2	2	2	2

Рисунок 5.48 – Матриця порівняння рангів альтернатив [розроблено автором]

За результатами застосування методів АНП, MOORA, TOPSIS, FTOPSIS можна зробити висновок, що для задачі вибору проєкту найкращою альтернативою є проєкт A_1 – «Розробка медичної інформаційної системи».

Реалізована в модулі методика для розв’язання задачі багатокритеріального прийняття рішень декількома методами з агрегуванням результатів дозволяє

визначити, які з них дають схожі або суттєво різні результати. Цей підхід також дозволяє оцінити, чи є відхилення значущими, або ж вони відповідають допустимій похибці. Крім того, він дає змогу оцінити якість роботи експертів, зокрема, наскільки точно вони виконали експертну оцінку вхідних даних за шкалою Сааті у контексті задачі прийняття рішень та виконали фазифікацію вхідних даних для застосування в методі FTOPSIS.

5.5 Висновки до розділу 5

В результаті проведеного дослідження в даному розділі зроблено концептуальне та логічне проектування веб-орієнтованої системи підтримки прийняття рішень для впровадження в діяльність компаній.

Після проведення концептуального проектування побудовано концептуальну модель функціонування веб-орієнтованої СППР «Decisioner». Також наведено абстрактну структуру піддоменів для впровадження СППР, що складається з інформаційно-реєстраційної частини та підсистеми підтримки прийняття рішень.

В результаті проектування побудовано логічну модель використання веб-орієнтованої СППР для адміністратора та користувача. Також спроектовано систему контролю доступу за допомогою UML-діаграм.

У межах цього розділу визначено інструменти для створення веб-орієнтованої СППР. Наведено основні характеристики обраних засобів розробки, обґрунтовано їхній вибір та доцільність використання для реалізації проєкту.

У даному розділі розроблено модулі веб-орієнтованої СППР для розв'язання деяких задач багатокритеріального прийняття рішень, зокрема:

- модуль для розв'язання задачі визначення рівнів ризиків та їх пріоритетів в управлінні проєктами комбінованим методом;
- модуль для розв'язання задачі тайм-менеджменту комбінованим методом;
- модуль для розв'язання задачі багатокритеріального прийняття рішень модифікованим методом Fuzzy TOPSIS;

- модуль для розв'язання задачі багатокритеріального прийняття рішень декількома методами з агрегуванням результатів.

Модуль для розв'язання задачі визначення рівнів ризиків та їх пріоритетів в управлінні проєктами комбінованим методом забезпечує в онлайн-режимі введення вхідних даних про проєкт та його ризики, автоматизацію процесу класифікації ризиків, визначення пріоритетів та рангів ризиків, візуалізацію одержаних результатів, а також надання рекомендацій користувачу щодо заходів для запобігання та усунення ризиків з найбільшими пріоритетами. Отримані експериментальні результати підтверджують доцільність застосування комбінованого методу розв'язання задачі визначення рівнів ризиків та їх пріоритетів. Експериментальні результати, одержані за допомогою створеного веб-ресурсу, підтверджують доцільність поєднання модифікованого методу матриці ризиків та МАІ для розв'язування задач управління ризиками у проєктах.

Модуль для розв'язання задачі тайм-менеджменту комбінованим методом забезпечує в режимі онлайн автоматизацію процесу класифікації вхідних задач до матриці Ейзенхауера за ступенями важливості та пріоритетності виконання. Отримані експериментальні результати підтверджують доцільність використання розробленого комбінованого методу до класифікації задач тайм-менеджменту, що використовує поєднання методу матриці Ейзенхауера та методу аналізу ієрархій.

Модуль для розв'язання задачі багатокритеріального прийняття рішень модифікованим методом Fuzzy TOPSIS надає можливість автоматизувати процес оцінки та вибору ефективної альтернативи, враховуючи специфіку роботи з нечіткими числами. Функціональність модуля була продемонстрована на прикладі практичного завдання щодо вибору стандарту управління ризиками в ІТ-проєктах. Інтеграція цього модуля в СППР забезпечує зручність використання модифікованого методу FTOPSIS і підвищення точності розрахунків та гнучкість прийняття рішень на основі врахування оцінок групової експертизи.

Модуль для розв'язання задачі багатокритеріального прийняття рішень декількома методами з агрегуванням результатів надає можливість визначити, які з них дають схожі або суттєво різні результати. Такий підхід також дозволяє

оцінити, чи є відхилення значущими, або ж вони відповідають допустимій похибці. Крім того, він дає змогу оцінити якість роботи експертів, зокрема, наскільки точно вони виконали експертну оцінку вхідних даних.

У особистому кабінеті користувача системи є можливість збереження протоколу розв'язання задач відповідними методами прийняття рішень, їх перегляд та можливість видалення.

Інтерфейс користувача розроблено з урахуванням принципів зручності та комфортності взаємодії із системою.

Розроблена СППР «Decisioner» впроваджена в діяльність ТОВ «Тріумф ІТ», ТОВ «РВК"ФЛАМІ» та в освітній процес в Черкаському державному технологічному університеті на кафедрі комп'ютерних наук та системного аналізу. Довідки про впровадження надано в Додатку А.

Структуру бази даних наведено в Додатку Е. Для реалізованих методів прийняття рішень створено інструкцію користувача (Додаток Ж), в якій: наведено перелік реалізованих в СППР методів прийняття рішень; наведено опис секцій головної веб-сторінки СППР; продемонстровано реалізацію реєстрації та авторизації в СППР.

Результати досліджень п'ятого розділу опубліковані в роботах [28, 32-37].

Список використаних джерел до розділу 5

1. Connolly, T., & Begg, C. (2015). Database Systems: A Practical Approach to Design, Implementation, and Management (6th ed.). Harlow: Pearson Education Limited. 1442 p.
2. Decisioner DSS. URL: <https://dss.knsa.chdtu.edu.ua> (дата звернення: 25.05.2025).
3. Ситник В. Ф. Системи підтримки прийняття рішень: Навч. посіб. К.: КНЕУ, 2009. 614 с.
4. PHP: Hypertext Preprocessor. URL: <https://www.php.net> (дата звернення: 25.05.2025).
5. JavaScript | MDN. URL: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/JavaScript> (дата звернення: 25.05.2025).

6. HTML5. URL: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Glossary/HTML5> (дата звернення: 25.05.2025).
7. CSS. URL: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/CSS> (дата звернення: 25.05.2025).
8. CMS WordPress. URL: <https://wordpress.org> (дата звернення: 25.05.2025).
9. Insert PHP Code Snippet. URL: <https://wordpress.org/plugins/insert-php-code-snippet/> (дата звернення: 25.05.2025).
10. All-in-One WP Migration and Backup. URL: <https://wordpress.org/plugins/all-in-one-wp-migration/> (дата звернення: 25.05.2025).
11. Duplicator. URL: <https://wordpress.org/plugins/duplicator/> (дата звернення: 25.05.2025).
12. RegistrationMagic. URL: <https://wordpress.org/plugins/custom-registration-form-builder-with-submission-manager/> (дата звернення: 25.05.2025).
13. ProfileGrid. URL: <https://wordpress.org/plugins/profilegrid-user-profiles-groups-and-communities/> (дата звернення: 25.05.2025).
14. LaTeX. URL: <https://www.latex-project.org/> (дата звернення: 25.05.2025).
15. Bootstrap. URL: <https://getbootstrap.com> (дата звернення: 25.05.2025).
16. jQuery. URL: <https://jquery.com> (дата звернення: 25.05.2025).
17. amCharts. URL: <https://www.amcharts.com> (дата звернення: 25.05.2025).
18. Plotly. URL: <https://plotly.com/> (дата звернення: 25.05.2025).
19. Visual Studio Code. URL: <https://code.visualstudio.com/> (дата звернення: 25.05.2025).
20. Prettier. URL: <https://marketplace.visualstudio.com/items?itemName=esbenp.prettier-vscode> (дата звернення: 25.05.2025).
21. PHP Tools. URL: <https://marketplace.visualstudio.com/items?itemName=DEVSENSE.phptools-vscode> (дата звернення: 25.05.2025).
22. FileZilla. URL: <https://filezilla-project.org/> (дата звернення: 25.05.2025).
23. MySQL. URL: <https://www.mysql.com> (дата звернення: 25.05.2025).
24. MAMP. URL: <https://www.mamp.info/en/windows/> (дата звернення: 25.05.2025).

25. Saaty, T.L. (1994). Highlights and critical points in the theory and application of the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research* 74 (3). P. 426–447.
26. Thomas L. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*; McGraw-Hill International Book Company, 1980, 287 p.
27. Як стати продуктивнішим за допомогою «коробки Ейзенхауера». URL: <https://dvokrapka.com/self/2016/03/yak-staty-produktyvnishym-za-dopomogoyu-korobky-ejzenhauera> (дата звернення: 25.05.2025).
28. Maksymov, A., & Tryus, Yu. (2025). Information technology for solving the multi-criteria decision-making problem using the modified Fuzzy TOPSIS method. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*, 30(1), pp. 91-106. ISSN 2306-4412 ISSN 2708-6070 (electronic). DOI: <https://doi.org/10.62660/bcstu/1.2025.91>.
29. Project Management Institute. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide) (7th ed.)*. Project Management Institute. 2021. 250. URL: <https://www.pmi.org/standards/pmbok> (дата звернення: 25.05.2025).
30. Upwork. URL: <https://www.upwork.com> (дата звернення: 25.05.2025).
31. Фріланс біржа в Україні Freelancehunt. URL: <https://freelancehunt.com/ua> (дата звернення: 25.05.2025).
32. Anton Maksymov, Yurii Tryus. Combined Method of Solving Time Management Tasks and Its Implementation in the Decision Support System. *Information Technology for Education, Science, and Technics Proceedings of ITEST 2022. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. Vol. 178. Springer. 2023. pp. 131-146. ISSN 2367-4512 ISSN 2367-4520 (electronic). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-35467-0_9.
33. Maksymov, A., Tryus, Y. (2024). Information Technology for Determining Risk Levels and Their Priorities in Project Management. In: Faure, E., et al. *Information Technology for Education, Science, and Technics. ITEST 2024. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol 222. Springer, Cham. 2024. pp. 89-107. ISSN 2367-4512 ISSN 2367-4520 (electronic). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-71804-5_7.

34. Максимов А. Є. Web-орієнтований ресурс для класифікації задач до матриці Ейзенхауера за методом аналізу ієрархій. *Тези доповідей VI Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології в освіті, науці і техніці» (ІТОНТ-2022)*, (Черкаси, 23-25 червня 2022 р.) [Електронний ресурс]. Черкаси : ЧДТУ, 2022. С. 41-44. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15540361>.
35. Максимов А.Є. Комбінований метод управління ризиками проєкту та його реалізація в системі підтримки прийняття рішень. *Тези доповідей IX Міжнародної науково-практичної конференції з проблем вищої освіти і науки «Інформаційні технології в освіті, науці і виробництві (ІТОНВ-2023) (25-26 травня 2023 року)*. Луцьк: відділ іміджу та промоції ЛНТУ, 2023. С. 246-250. URL: https://itonv.lntu.edu.ua/files/2023/zbirnyk_itonv-2023.pdf.
36. Максимов А.Є. Інформаційна технологія застосування методу TOPSIS для задач пошуку проєктів для ІТ-компанії. *Збірник тез доповідей II Міжнар. наук.-практич. конфер. «Інновації та перспективні шляхи розвитку інформаційних технологій» (06 груд. 2023 р., м. Черкаси)* [Електронний ресурс] / упоряд. : Т. О. Прокопенко, Я. В. Тарасенко ; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. Черкаси : ЧДТУ, 2023. С. 73-75. URL: https://drive.google.com/file/d/1f0cc_HaFDH4G3AI_NfwqfTjaMjyWBvkc/view.
37. Максимов А.Є., Триус Ю.В. Інформаційна технологія визначення рівнів ризиків та їх пріоритетів в управлінні проєктами. *Тези доповідей VII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології в освіті, науці і техніці» (ІТОНТ-2024)*, (Черкаси, 23-24 травня 2024 р.) [Електронний ресурс]. Черкаси : ЧДТУ, 2024. С. 111-114. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14766662>.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну задачу, що полягає в удосконаленні існуючих та розробці нових моделей, методів та інформаційних засобів, які дозволять підвищити ефективність прийняття рішень в умовах багатокритеріальності, ризику, невизначеності та нечіткої інформації.

За результатами наукового дослідження були зроблені наступні висновки:

1. Проаналізовано предметну область наукового дослідження, сучасний стан розвитку інформаційних технологій підтримки прийняття рішень, існуючі моделі та методи багатокритеріального прийняття рішень, виявлено їхні переваги та обмеження, систематизовано інформаційні ситуації прийняття рішень у складних умовах, зокрема в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації.

2. Розроблено нові та удосконалено існуючі моделі багатокритеріального прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації, зокрема:

- концептуальну модель R-U-F можливих ситуацій прийняття рішень, яка відображає взаємозв'язок між основними типами складних інформаційних ситуацій, що виникають під час багатокритеріального прийняття рішень: інформаційною ситуацією прийняття рішень в умовах ризику (Risk, R), інформаційною ситуацією прийняття рішень в умовах повної невизначеності (Uncertainty, U) та інформаційною ситуацією прийняття рішень в умовах нечіткої інформації (Fuzzy, F);

- модель процесу прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації, що відповідає запропонованій концептуальній R-U-F-моделі можливих інформаційних ситуацій прийняття рішень і передбачає вибір кількох методів прийняття рішень як традиційних, так і модифікованих, комбінованих та гібридних методів для розв'язання поставленої задачі з подальшим агрегуванням одержаних результатів;

- модель управління ризиками проекту (Project Risk Management Model) удосконалено за рахунок введення додаткових компонент серед яких: вхідна інформація про наявні ризики проекту, рівні ризиків, критерії оцінювання ризиків,

експертні оцінки для кожного ризику за заданими критеріями; процедура визначення належності ризиків проєкту до певного рівня ризиків, процедуру визначення пріоритетів ризиків проєкту за допомогою методу аналізу ієрархій; вихідна інформація про належність ризиків проєкту до відповідних рівнів ризиків; вектор пріоритетів ризиків проєкту і вектор їх рангів; реєстр ризиків з переліком заходів щодо запобігання та усунення ризиків проєкту.

3. Розроблено комбіновані та модифіковані методи прийняття рішень для розв'язання задач багатокритеріального прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації, зокрема:

- метод визначення рівнів ризиків та їх пріоритетів, який є комбінацією модифікованого методу матриці ризиків і методу аналізу ієрархій, що надає можливість з високою точністю оцінювати ризики за більш широкою шкалою і більшою кількістю критеріїв, ніж традиційний метод матриці ризиків;
- комбінований метод для класифікації задач тайм-менеджменту, що поєднує в собі метод матриці Ейзенхауера і метод аналізу ієрархії для визначення пріоритетів задач, в результаті чого надаються рекомендації щодо послідовності їх виконання у відповідності до важливості та пріоритету;
- модифікований метод Fuzzy TOPSIS для вибору ефективної альтернативи в задачі багатокритеріального прийняття рішень в умовах нечіткої інформації із застосуванням різних метрик і використанням результатів групової експертизи.

4. Розроблено веб-орієнтовану інформаційну технологію для розв'язання задач багатокритеріального прийняття рішень, що реалізує як відомі, так і розроблені моделі та методи прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації, а також забезпечує інтерактивну роботу користувача і дозволяє ефективно застосовувати розроблену інформаційну технологію на практиці.

5. Апробовано та впроваджено результати наукового дослідження, перевірено працездатність розробленої інформаційної технології на реальних і демонстраційних задачах прийняття рішень, переважно зі сфери управління ІТ-

проєктами. Проаналізовано отримані результати застосування запропонованих моделей, методів та інформаційних засобів прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

- розроблено методику застосування декількох методів прийняття рішень в межах однієї задачі з агрегуванням результатів за різними підходами до визначення вагових коефіцієнтів методів, зокрема: за допомогою експертного оцінювання; з використанням процедури парних порівняння методу аналізу ієрархій; з використанням середнього геометричного для випадку рівної важливості методів;
- розроблено методику для порівняння результатів застосування методів прийняття рішень TOPSIS, FTOPSIS та їх модифікацій, одержаних за допомогою різних метрик для оцінювання коефіцієнту близькості до нечіткого позитивного ідеального розв'язку (FPIS) та нечіткого негативного ідеального розв'язку (FNIS);
- створено модулі веб-орієнтованої СППР, що реалізують розроблені моделі та методи багатокритеріального прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації, а також забезпечують інтерактивну роботу користувача і дозволяють ефективно застосовувати розроблену інформаційну технологію на практиці.

Практичне значення отриманих результатів дисертаційного дослідження підтверджено впровадженням розробленої інформаційної технології для розв'язання задач багатокритеріального прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації у різних компаніях та в освітній процес Черкаського державного технологічного університету.

Реалізація та впровадження розроблених моделей, методів і програмного забезпечення сприяло підвищенню результативності роботи компаній, що дозволило знизити витрати часу та фінансових ресурсів на розробку проєктів на 5-10% за рахунок більш об'єктивного, обґрунтованого і оперативного прийняття рішень.

Науково-практичні результати, що були отримані в дисертаційній роботі, можуть бути використані в діяльності організацій будь-якої форми власності та будь-якого напрямку бізнесу в процесах прийняття рішень.

Подальші перспективи наукового дослідження доцільно спрямувати на:

- адаптацію запропонованої моделі процесу прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації до динамічних умов прийняття рішень, зокрема в реальному часі та з урахуванням змін у пріоритетах критеріїв;
- інтеграцію в систему підтримки прийняття рішень інших популярних методів MADM, зокрема: ELECTRE, PROMETHEE, VIKOR, CBR, GRA/GRM, а також методів, що ґрунтуються на інших підходах до розв'язання задач прийняття рішень, зокрема заснованих на нечіткій логіці та машинному навчанні.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Акти впровадження результатів роботи



ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ "ТРИУМФ ІТ"

Юридична адреса: м. Черкаси, вул. Добровольського, 1
www.tg.ck.ua, електронна пошта: office@tg.ck.ua
Телефон: /0472/ 56-76-85

АКТ

використання результатів дисертаційної роботи

Максимова Антона Євгенійовича

«Інформаційна технологія для розв’язання задач багатокритеріального прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації»

Даний акт підтверджує, що розроблена Максимовим А.Є. інформаційна технологія для розв’язання задач багатокритеріального прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації застосовувалась компанією в процесах управління ІТ-проектами протягом 2023-2024 рр. Дослідження спрямоване на створення та реалізацію інформаційної технології для підтримки прийняття рішень, яка допомагає керівникам ІТ-компаній приймати ефективні рішення в умовах складних бізнес-сценаріїв, що супроводжуються ризиками, невизначеністю та обмеженою кількістю точних даних.

У межах дисертаційного дослідження з метою покращення бізнес-процесів управління ІТ-проектами розроблено систему підтримки прийняття рішень (СППР) «Decisioner» для ТОВ «Тріумф ІТ», в яку інтегровано: комбінований метод розв’язування задач тайм-менеджменту, який базується на застосуванні матриці Ейзенхауера; комбінований метод розв’язання задачі визначення рівнів ризиків та їх пріоритетів, який базується на застосуванні матриці ризиків та методу аналізу ієрархій; модифікований метод FUZZY TOPSIS для розв’язування задачі багатокритеріального прийняття рішень.

Використання запропонованої дисертантом інформаційної технології, що розроблена на основі нових наукових моделей та методів, сприяло підвищенню результативності роботи ТОВ «Тріумф ІТ», що дозволило знизити витрати часу та фінансових ресурсів на розробку ІТ-проектів на 5-10 % за рахунок більш об’єктивного і оперативного прийняття рішень.

Результати дисертаційної роботи Максимова А.Є. доцільно застосовувати в процесах управління ІТ-проектами.

Директор ТОВ «Тріумф ІТ»

17.03.2025



О.М. Панчешний

АКТ
використання результатів дисертаційної роботи
Максимова Антона Євгенійовича
«Інформаційна технологія для розв'язання задач багатокритеріального прийняття рішень в
умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації»

Даний акт засвідчує, що розроблена Максимовим А.Є. інформаційна технологія підтримки прийняття рішень для вирішення управлінських завдань в умовах ризику, невизначеності та неповної інформації була впроваджена та використовується у виробничо-управлінських процесах підприємства, що спеціалізується на виготовленні рекламної продукції.

У межах дисертаційного дослідження з метою удосконалення бізнес-процесів управління діяльністю підприємства впроваджено систему підтримки прийняття рішень (СППР) «Decisioner» для ТОВ «РВК"ФЛАМІ», до складу якої інтегровано: комбінований метод розв'язування задач тайм-менеджменту, який базується на застосуванні матриці Ейзенхауера; комбінований метод розв'язання задачі визначення рівнів ризиків та їх пріоритетів, який базується на застосуванні матриці ризиків та методу аналізу ієрархій; модифікований метод FUZZY TOPSIS для розв'язування задачі багатокритеріального прийняття рішень.

Впровадження інформаційної технології, розробленої на основі нових математичних моделей і методів у межах дисертаційного дослідження, позитивно вплинуло на підвищення ефективності діяльності ТОВ «РВК"ФЛАМІ». Використання цієї інформаційної технології забезпечило скорочення витрат часу та фінансових ресурсів на виконання виробничо-управлінських завдань на 5–8 % за рахунок підвищення обґрунтованості, швидкості та адаптивності процесу прийняття управлінських рішень.

Отримані результати підтверджують практичну цінність і доцільність впровадження розроблених підходів для покращення управління підприємством.

Генеральний директор
ТОВ «РВК"ФЛАМІ»

07.05.2025



Олександр УХАНЬ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Перший проректор
Черкаського державного
технологічного університету
Артем ГОНЧАРОВ
«08» червня 2024 р.

АКТ

використання результатів дисертаційної роботи
Максимова Антона Євгенійович

«Інформаційна технологія для розв'язання задач багатокритеріального прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації» в освітньому процесі

Комісія у складі:

голови – завідувача кафедри комп'ютерних наук та системного аналізу Черкаського державного технологічного університету доктора педагогічних наук, кандидата фізико-математичних наук, професора Триуса Ю.В.;

членів комісії – доктора технічних наук, професора, професора кафедри комп'ютерних наук та системного аналізу Данченко О.Б., кандидата технічних наук, доцента, професора кафедри комп'ютерних наук та системного аналізу Підгорного М.В.

склала цей акт про те, що результати дисертаційного дослідження Максимова А.Є., а також результати, що отримані ним в рамках науково-дослідної роботи кафедри «Веб-орієнтовані інформаційні технології підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності, ризику та нечіткої інформації для підприємств малого і середнього бізнесу та закладів вищої освіти» (№ державної реєстрації: 0124U000900, 2024 – 2027 р.р.), були використані в процесі підготовки навчальних матеріалів для лекційних занять та лабораторних робіт з дисципліни «Теорія прийняття рішень» підготовки здобувачів освітнього ступеня бакалавр за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки, освітня програма «Комп'ютерні науки та прикладне програмування», з дисципліни «Системи і методи прийняття рішень в управлінні стартапами та проектами в галузі інформаційних технологій» для здобувачів освітнього ступеня магістр за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки, освітня програма «Управління стартапами і проектами в галузі інформаційних технологій», з дисципліни вільного вибору «Нечіткі моделі і методи прийняття рішень» для здобувачів освітнього ступеня магістр всіх спеціальностей і всіх освітніх програм галузі знань 12 Інформаційні технології Черкаського державного технологічного університету.

Розроблена Максимовим А.Є. у межах дисертаційного дослідження веб-орієнтована система підтримки прийняття рішень «Decisioner» використовується як при проведенні лабораторних робіт із зазначених дисциплін для реалізації методів багатокритеріального прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації, так і при проведенні науково-дослідної роботи студентів та аспірантів кафедри.

Застосування науково-практичних результатів дисертаційного дослідження Максимова Антона Євгенійович сприяє підвищенню рівня засвоєння навчального матеріалу дисциплін здобувачами за рахунок поглибленого вивчення сучасних методів прийняття рішень, а також набуттю ними практичних навичок роботи з сучасним програмним забезпеченням.

Голова комісії

завідувач кафедри КНСА
д.пед.н., к.ф.-м.н., професор



Юрій ТРИУС

Члени комісії:

професор кафедри КНСА,
д.т.н., професор
професор кафедри КНСА,
к.т.н., доцент



Олена ДАНЧЕНКО

Микола ПІДГОРНИЙ

ДОДАТОК Б

Список опублікованих праць за темою дисертації:

- *статті у іноземних виданнях, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Anton Maksymov, Yurii Tryus. Combined Method of Solving Time Management Tasks and Its Implementation in the Decision Support System. *Information Technology for Education, Science, and Technics Proceedings of ITEST 2022*. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. Vol. 178. Springer. 2023. pp. 131-146. (0,87 д. а.). ISSN 2367-4512 ISSN 2367-4520 (electronic). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-35467-0_9. Scopus, Web of Science.

Особистий внесок автора полягає у розробленні нового комбінованого методу розв'язання задачі тайм-менеджменту, що поєднує в собі метод аналізу ієрархії та метод матриці Ейзенхауера, а також створенні відповідного модуля веб-орієнтованої системи підтримки прийняття рішень та становить 0,65 друк. арк.

2. Maksymov, A., Tryus, Y. (2024). Information Technology for Determining Risk Levels and Their Priorities in Project Management. In: Faure, E., et al. *Information Technology for Education, Science, and Technics. ITEST 2024*. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 222. Springer, Cham. 2024. pp. 89-107. (1,24 д. а.). ISSN 2367-4512 ISSN 2367-4520 (electronic). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-71804-5_7. Scopus, Web of Science.

Особистий внесок автора полягає у розробленні моделі управління ризиками проєкту (Project Risk Management Model), нового методу визначення рівнів ризиків та їх пріоритетів, який є комбінацією модифікованого методу матриці ризиків і методу аналізу ієрархій, а також створенні відповідного модуля веб-орієнтованої системи підтримки прийняття рішень та становить 0,93 друк. арк.

- *статті у наукових фахових виданнях України, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

3. Максимов, А. (2025). Аналіз стандартів управління ризиками та їх використання в ІТ-проєктах. *Управління розвитком складних систем*, (61), С. 66–

75. Київ: КНУБА. (1,1 д. а.). ISSN 2219-5300. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2025.61.66-75>. Фахове видання категорії Б.

4. Maksymov, A., & Tryus, Yu. (2025). Information technology for solving the multi-criteria decision-making problem using the modified Fuzzy TOPSIS method. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*, 30(1), pp. 91-106. (1,27 д. а.). ISSN 2306-4412 ISSN 2708-6070 (electronic). DOI: <https://doi.org/10.62660/bcstu/1.2025.91>. Фахове видання категорії Б.

Особистий внесок автора полягає у розробленні модифікованого методу Fuzzy TOPSIS для вибору ефективної альтернативи в задачі багатокритеріального прийняття рішень на основі різних метрик і використання результатів групової експертизи; розробленні методики порівняння результатів, одержаних різними методами за різними метриками для обчислення коефіцієнту близькості до нечіткого позитивного ідеального розв'язку (FPIS) та нечіткого негативного ідеального розв'язку (FNIS) та становить 0,95 друк. арк.

– наукові праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. Максимов А. Є. Web-орієнтований ресурс для класифікації задач до матриці Ейзенхауера за методом аналізу ієрархій. *Тези доповідей VI Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології в освіті, науці і техніці» (ІТОНТ-2022)*, (Черкаси, 23-25 червня 2022 р.) [Електронний ресурс]. Черкаси : ЧДТУ, 2022. С. 41-44. (0,21 д. а.). DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15540361>.

6. Єфімов В. В., Оксамитна Л. П., Максимов А. Є., Триус Ю. В. Веб-орієнтований ресурс для проведення групової експертизи методами прийняття рішень. *Тези доповідей VI Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології в освіті, науці і техніці» (ІТОНТ-2022)*, (Черкаси, 23-25 червня 2022 р.) [Електронний ресурс]. Черкаси : ЧДТУ, 2022. С. 37-40. (0,23 д. а.). DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15540361>.

Особистий внесок автора полягає у проведеному огляді і аналізі деяких існуючих веб-ресурсів для прийняття рішень та становить 0,02 друк. арк.

7. Юрій Триус, Антон Максимов, Віктор Єфімов. Задачі, методи та

інформаційні технології прийняття рішень у медичному менеджменті. *Актуальні задачі медичної, біологічної фізики та інформатики*. Матеріали доповідей та виступів всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю 27 квітня 2022 року. Вінниця: Едельвейс. С. 60-65. (0,53 д. а.). ISBN 978-617-7237-95-1 (електронне видання) URL: https://dspace.vnmu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/5660/Матеріали%20конференції_Актуальні%20задачі%20медичної%20біологічної%20фізики%20та%20інформатики_27.04.2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Особистий внесок автора полягає у проведеному аналізі веб-ресурсів, що надають можливість розв'язувати задачі прийняття рішень в онлайн-режимі та становить 0,05 друк. арк.

8. Максимов А.Є. Комбінований метод управління ризиками проекту та його реалізація в системі підтримки прийняття рішень. *Тези доповідей IX Міжнародної науково-практичної конференції з проблем вищої освіти і науки «Інформаційні технології в освіті, науці і виробництві (ІТОНВ-2023) (25-26 травня 2023 року)*. Луцьк: відділ іміджу та промоції ЛНТУ, 2023. С. 246-250. (0,16 д. а.). URL: https://itonv.lntu.edu.ua/files/2023/zbirnyk_itonv-2023.pdf.

9. Максимов А.Є. Інформаційна технологія застосування методу TOPSIS для задач пошуку проектів для ІТ-компанії. *Збірник тез доповідей II Міжнар. наук.-практич. конфер. «Інновації та перспективні шляхи розвитку інформаційних технологій» (06 груд. 2023 р., м. Черкаси) [Електронний ресурс] / упоряд. : Т. О. Прокопенко, Я. В. Тарасенко ; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. Черкаси : ЧДТУ, 2023. С. 73-75. (0,11 д. а.). URL: https://drive.google.com/file/d/1f0cc_HaFDH4G3AI_NfwqfTjaMjyWBvkc/view.*

10. Максимов А.Є., Триус Ю.В. Інформаційна технологія визначення рівнів ризиків та їх пріоритетів в управлінні проектами. *Тези доповідей VII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології в освіті, науці і техніці» (ІТОНТ-2024), (Черкаси, 23-24 травня 2024 р.) [Електронний ресурс]*. Черкаси : ЧДТУ, 2024. С. 111-114. (0,28 д. а.). DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14766662>.

Особистий внесок автора полягає у побудові моделі управління ризиками

проекту (Project Risk Management Model) та розробці методу для аналізу ризиків проекту, який є комбінацією модифікованого методу матриці ризиків та методу аналізу ієрархій; розробленні веб-орієнтованого модуля системи підтримки прийняття рішень, що забезпечує автоматизацію процесу розподілу ризиків за критеріями важливості, визначення пріоритетів ризиків та їх ранжування, візуалізацію результатів аналізу ризиків, а також генерацію реєстру ризиків з рекомендаціями щодо їх запобігання та усунення та становить 0,21 друк. арк.

ДОДАТОК В

Огляд веб-ресурсів для прийняття рішень

1. *Веб-ресурс «Decision Lens»*. Ця система призначена для підтримки процесу прийняття рішень для отримання оптимальних результатів в умовах обмеженості ресурсів. Система почала розроблятися у 2005 році засновниками Decision Lens, Джоном і Деном Сааті, за безпосередньої підтримки Томаса Сааті, що реалізує його метод аналізу ієрархій (MAI) (Analytic Hierarchy Process, АНР). Головною особливістю системи є організація онлайн хосту для проведення віртуальних зустрічей експертів для прийняття спільних рішень протягом спеціально виділених сесій. Інтерактивний спрощений інтерфейс надає можливість проводити голосування експертів шляхом введення результатів у робочу область.

Система має такі функціональні можливості: підтримує створення одночасних сценаріїв; надає можливість встановлювати пріоритети на кожному рівні ієрархії шляхом попарних порівнянь; перевіряти вплив та зміни пріоритетів методом аналізу чутливості; надає можливість застосовувати бізнес-правила для розподілу бюджету; має розвинені засоби візуалізації результатів роботи.

Даний комерційний продукт має вбудований персональний помічник для кожного аккаунту (Client Decision Manager) та навчальну дистанційну програму для університетів.

Переваги «Decision Lens»: реалізовано MAI; підтримка групової експертизи через онлайн сесії; наочна візуалізація результатів з інтерпретацією прийняття рішення; можливість створення кількох сценаріїв; довідка для користувача.

Недоліки «Decision Lens»: комерційний платний продукт; може бути дорогим для малих організацій; складність навчання роботі з системою.

2. *Веб-ресурс «Business Performance Management»*. Це безкоштовний веб-ресурс на базі методу аналізу ієрархій, як інструмент для процесу прийняття рішень. MAI використовується як для індивідуальної, так і групової експертизи. Можна зберігати ієрархії поставленої задачі та використовувати їх, щоб оцінити вагу критеріїв і підкритеріїв, можна оцінити до семи альтернативних рішень. Результати парного порівняння розташовані в матриці.

Для того, щоб скористатись ресурсом, потрібно зареєструватись та авторизуватись. Ресурс містить матеріали про основні поняття, методи та інструменти для прийняття рішень.

Веб-ресурс розроблений на базі CMS WordPress, скрипти написані на PHP. У веб-ресурсі є можливість перевести гроші розробнику для його підтримки, сервіс оплати – PayPal. Оскільки розробка була проведена на WordPress, то в системі використовується СКБД MySQL.

Переваги «Business Performance Management»: реалізовано MAI; безкоштовний доступ; інтуїтивно зрозумілий інтерфейс; підтримка групової експертизи.

Недоліки «Business Performance Management»: обмежена кількість альтернатив до 7; обов'язкова реєстрація; базовий функціонал без додаткових інструментів аналізу.

3. *Веб-ресурс «Online Output»*. Це комерційний продукт для прийняття рішень, яке реалізує MAI у онлайн режимі. Демоверсія є доступною безкоштовно з обмеженим функціоналом. Для розширення функціоналу, а саме доступу до групової експертизи онлайн, потрібно оплатити відповідний тарифний план.

Веб-ресурс вимагає внесення даних через матрицю порівнянь напряду, тобто немає графічного інтерфейсу внесення даних у систему. Принцип внесення даних не дуже зручний та інтуїтивно незрозумілий. Наприклад, внесення оберненої оцінки у матрицю зроблено через дробові числа, тобто щоб показати що альтернатива «A1» значно програє альтернативі «A2» потрібно вручну ввести дробове число, наприклад, «0.2», що не дуже зручно.

Усі проекти, що створені користувачем зберігаються та їх можна редагувати навіть після проведення обрахунків, але це стосується демоверсії, де групова експертиза проводиться на одному пристрої офлайн.

Веб-ресурс розподілений на дві частини. Перша частина виконує роль візитівки платформи, де знаходяться посилання на його другу частину, де проводиться робота з проектами та обрахунки матриць порівнянь критеріїв та альтернатив. Тут є короткий опис MAI та інструкція

з використання ресурсу, де описано як вносити дані у матрицю порівнянь, а також про роботу його в цілому.

Перша частина веб-ресурсу розроблена за допомогою CMS WordPress, використовується СКБД MySQL. Дізнатись про засоби розробки другої (функціональної) частини неможливо, оскільки цей домен є закритим для доступу адміністратором.

Переваги «*Online Output*»: реалізовано МАІ; наявність безкоштовної демоверсії; можливість збереження та редагування проєктів; введення даних через графічний інтерфейс у вигляді матриці.

Недоліки «*Online Output*»: обмежений функціонал в демоверсії; незручне введення дробових значень; відсутність графічного інтерфейсу для введення даних.

4. Веб-ресурс «*123ahr*». Це безкоштовний веб-додаток для прийняття рішень на базі МАІ з можливістю групової експертизи. Веб-ресурс не є комплексним та складним, тому що розроблений для безкоштовного використання. Він не є адаптивним, але тим не менш він є зрозумілим та не вимагає від користувача знання ніякої теорії. Також на сайті є короткий опис МАІ та інструкція по роботі з сервісом. Інтерфейс був розроблений спеціально для звичайного користувача, який хоче прийняти рішення за допомогою онлайн сервісу. В цій системі можливе проведення групової експертизи. Доступ до експертизи надається через електронну пошту. Є можливість зробити групову експертизу приватною, тобто результати експертизи можуть бути переглянутими тільки тим, хто створив експертизу. Також сервіс надає можливість зберегти виконані розрахунки в особистий кабінет.

Робота з веб-ресурсом реалізована через керування проєктами, їх цілі, критерії та альтернативи. Введення даних у матрицю порівнянь ведеться через графічний інтерфейс, який є інтуїтивно зрозумілим та не вимагає ручного введення даних до матриці. Також це зменшує час, що витрачається на порівняння варіантів.

Переваги «*123ahr*»: реалізовано МАІ; безкоштовний доступ; підтримка групової експертизи із запрошенням через email; інтуїтивно зрозумілий інтерфейс.

Недоліки «*123ahr*»: відсутня перевірка транзитивності; обмежений функціонал для складних розрахунків; немає можливості редагування даних після отримання результату.

5. Веб-ресурс «*Expert Choice*» також базується на методі МАІ. Система надає можливість будувати багаторівневі ієрархії, проводити попарні порівняння альтернатив і критеріїв за допомогою таблиць і графічно. Система розраховує індекси узгодженості експертів і надає можливість відразу скорегувати висновки експертів і перерахувати результати. Система має можливість графічно відтворювати результати аналізу, виконувати імпорт/експорт даних. Також є можливість отримати обмежену десктопну систему в рамках співпраці з університетами.

Переваги «*Expert Choice*»: реалізовано МАІ; графічне та табличне введення даних; підтримка групової експертизи; можливість редагування даних після отримання результату; імпорт/експорт даних.

Недоліки «*Expert Choice*»: комерційний платний продукт; ліміти для користувачів; можливе перевантаження при великій кількості даних.

6. Веб-ресурс «*Super Decisions*». Ця система для прийняття рішень постачається для ОС Windows та Mac і має як ручне введення даних, так і завантаження із зовнішніх джерел. Але, дана система не передбачає використання експертних оцінок. Натомість, в ній наявний потужний метод аналізу мереж, який був запропонований Томасом Сааті. Система дозволяє працювати з раніше створеними і демонстраційними моделями, а також шаблонами.

Переваги «*Super Decisions*»: підтримка завантаження даних з зовнішніх джерел; реалізовано МАІ та метод аналітичних мереж (ANP); робота з шаблонами та демонстраційними моделями.

Недоліки «*Super Decisions*»: відсутня підтримка групової експертизи; більше підходить для складних моделей, а не для швидкого прийняття рішень.

7. Веб-ресурс «*SpiceLogic*». Компанія SpiceLogic Inc. з 2007 року спеціалізується на розробці технічно передових, інтуїтивно зрозумілих програмних продуктів. Компанія розробляє рішення для підтримки широкого кола споживачів, таких як менеджери проєктів, особи, які

приймають рішення, інженери, IT-фахівці та студенти. Продукти компанії SpiceLogic Inc. реалізують найбільш популярні методи прийняття рішень, зокрема: дерева рішень; метод аналізу ієрархій; ланцюги Маркова; мережі Байєса. В системі наявна можливість моделювання методом Монте-Карло. Кожну діаграму можна переглянути як таблицю даних або експортувати в Excel. Результат виконаного аналізу можна зберегти як звіт у форматі PDF або Excel.

Серед додаткових можливостей веб-ресурсу можна виділити: налаштування моделей, налаштування сценаріїв, інтерактивна візуалізація результатів та збереження моделей у вигляді звітів або діаграм. Інтерфейс є зручним, що дозволяє швидко опанувати наявні інструменти для підтримки прийняття рішень. Веб-ресурс SpiceLogic та його компоненти можуть бути використані як в освітньому процесі, так і у практичній діяльності. Програмний продукт платний та пропонує придбати ліцензію за різними тарифними планами.

Переваги «*SpiceLogic*»: реалізовано MAI; підтримка різних методів прийняття рішень (дерева рішень; метод аналізу ієрархій; ланцюги Маркова; мережі Байєса); інтуїтивно зрозумілий інтерфейс; підходить для різних користувачів: менеджерів, інженерів, студентів.

Недоліки «*SpiceLogic*»: може бути складним для недосвідчених користувачів; відсутність гнучкості в налаштуваннях для специфічних потреб.

ДОДАТОК Г

Огляд методів і програмних засобів управління ризиками

Г.1 Огляд методів управління ризиками

В пункті наведено методи які рекомендовано використовувати для управління ризиками за стандартом ISO 31010.

1. Мозковий штурм (англ. Brainstorming) – допоміжний метод ризик-менеджменту, який забезпечує збирання великої кількості ідей та оцінок від компетентних осіб щодо ідентифікації потенційних видів відмов та пов'язаних з ними чинників, критерії прийняття рішень. Сформований перелік ідей та оцінок у подальшому ранжується групою експертів. Цей метод передбачає застосування спеціальних прийомів активізації учасників обговорення.

2. Структуроване або напівструктуроване опитування (англ. Structured or semi-structured interviews) – допоміжний метод ризик-менеджменту, який забезпечує збирання інформації від компетентних осіб щодо ідентифікації потенційних ризиків за допомогою аркушів наведених запитань. Застосовується у випадку, коли зібрати експертів для «мозкової атаки» неможливо або недоречно. Є засобом щодо отримання вхідних даних для подальшого загального оцінювання ризиків.

3. Метод Дельфі (англ. Delphi method), або метод експертних оцінок – допоміжний метод ризик-менеджменту, який забезпечує підготовку консенсусної оцінки групи експертів, які сприятимуть ідентифікуванню джерела ризику та впливу, кількісному оцінюванню ймовірностей й наслідків, оцінювання ризиків. Передбачає індивідуальну незалежну роботу експертів.

4. Переліки контрольних запитань (англ. Checklist) – метод пошуку, що дозволяє ідентифікувати ризики, уможливлючи складання переліку типових невизначеностей для подальшого їх розгляду.

Наступні методи більш формалізовані для ідентифікації ризиків та небезпеки, їх назви говорять самі за себе.

5. Попередній аналіз небезпечних чинників (РНА) (англ. Preliminary hazard analysis, РНА) – метод пошуку, призначений для ідентифікації небезпечних чинників та ситуацій/подій, що можуть завдати шкоду конкретним видам діяльності, технічному засобу чи системі.

6. Дослідження небезпечних чинників і працездатності (HAZOP) (англ. Hazard and operability study, HAZOP) – метод функційного аналізування, який дає змогу ідентифікувати ризики, щоб визначити можливі відхилення від передбачуваної/очікуваної діяльності, виявити критичність відхилів.

7. Аналізування небезпечних чинників і критичні точки контролю (НАССР) (англ. Hazard analysis and critical control points, НАССР) – метод функційного аналізування, який є систематичним, проактивним і прентивним для забезпечення якості продукції, надійності та безпечності процесів за допомогою вимірювання і моніторингу перебування визначених характеристик у встановлених межах.

8. Загальне оцінювання екологічного ризику (англ. Toxicity assessment) – метод аналізування сценарію, який дозволяє ідентифікувати та аналізувати небезпечні чинники, можливі способи впливу цього чинника на цільовий об'єкт задля встановлення ймовірності виникнення конкретної шкоди.

9. Структурований метод «Що якщо» (SWIFT) (англ. Structured What If Technique, SWIFT) – допоміжний метод ризик-менеджменту, що стимулює тематичні робочі групи експертів ідентифікувати ризики.

10. Аналіз сценаріїв (англ. Scenario analysis) – метод, що належить до групи аналізування сценарію, який забезпечує визначення уявленням або екстраполяцією на основі ризиків, зокрема – фактичних, за припущенням, що кожний із сценаріїв можна реалізувати.

11. Аналіз впливу на діяльність (англ. Business impact analysis, BIA) – метод, який дає змогу аналізувати критичність і строки відновлення ключових бізнес-процесів, які постраждали внаслідок дестабілізації, пов'язаних з цими процесами ресурсів (персонал, устаткування, інформаційні технології), забезпечуючи досягнення цілей організації.

12. Аналіз першопричин (англ. Root cause analysis) – метод аналізу сценарію, який забезпечує аналіз окремої втрати, що сталася з метою розуміння зумовлених чинників та того, як систему чи процес можна вдосконалити, щоб у подальшому уникнути аналогічних втрат.

13. Аналіз видів і наслідків відмов (англ. Failure mode and effects analysis, FMEA) – метод функційного аналізування, який дає змогу ідентифікувати характер відмов і чинники їх виникнення, їхні впливи. Застосовуються до аналізування: 1) проєкту (продукції); 2) системи, 3) виробничого чи складального процесу, 4) послуг, 5) програмних засобів. Може бути доповнений аналізування критичності із визначенням важливості кожного виду відмов за допомогою якісних, напівкількісних чи кількісних підходів.

14. Аналіз дерева відмов (англ. Fault tree analysis) – метод аналізування сценарію, за яким спочатку зазначають небажану кінцеву подію, а потім визначають усі способи за якими вона може відбутися. Елементи відображають графічно у формі деревоподібної схеми для подальшого аналізу способів послаблення/усунення потенційних небезпек.

15. Аналіз дерева подій (англ. Event tree analysis) – метод аналізування сценарію, який забезпечує переведення ймовірностей різних першоподій у можливі результати.

16. Аналіз причин і наслідків (англ. Cause and consequence analysis) – метод аналізування сценарію, що поєднує аналізування дерева відмов і дерева подій, яке дає змогу враховувати затримки у часі.

17. Аналіз причино-наслідкових зв'язків (англ. Cause-and-effect analysis) – метод аналізування сценарію, який забезпечує групування зумовлених чинників ризику у різні категорії. Результат відображається графічно у формі деревоподібної структури чи діаграми Ісікави.

18. Аналіз рівнів захисту (LOPA) (англ. Layer protection analysis, LOPA) – метод загального оцінювання засобів контролювання, їх результативності (інша назва – метод бар'єрів)

19. Дерево рішень (англ. Decision tree) – метод, що застосовують у керуванні проєктними ризиками чи за інших обставин для вибору найкращого способу дій за наявності невизначеності у формі деревоподібної діаграми.

20. Загальне оцінювання надійності людини (англ. Human reliability analysis, HRA) – допоміжний метод ризик-менеджменту, який забезпечує оцінки впливу помилок персоналу на дієвість системи.

21. Аналіз за схемою «краватка-метелик» (англ. Bow tie analysis) – простий метод загального оцінювання засобів контролювання, який надає змогу описати та проаналізувати варіанти розвитку ризику з початку (визначення небезпечних чинників) до наслідків, поєднуючи у графічній формі дерево відмов (аналіз причин подій) і дерева подій (аналізування наслідків).

22. Технічне обслуговування, зорієнтоване на забезпечення безвідмовності (англ. Reliability centered maintenance) – метод функційного аналізування, який дає змогу ідентифікувати політики, які треба запровадити для керування відмовами, щоб ефективно та результативно досягати необхідного рівня безпеки, готовності та економічності функціонування всіх типів устаткування.

23. Аналіз паразитних схем (англ. Sneak circuit analysis) – метод функційного аналізування, який дає змогу ідентифікувати паразитні (приховані) стани технічного засобу, програмного засобу чи їх поєднання, які мають випадковий характер; станів, що можуть спричинити виникнення небажаної події чи перешкоджати виникненню бажаної події та не може бути спричинений відмовою якогось складника.

24. Марковський аналіз (англ. Markov analysis) – статистичний метод, що зазвичай використовується для аналізування ремонтпридатності складних систем, які можуть бути у багатьох станах, зокрема – у стані спровності (іноді називають аналізуванням «простору станів»).

25. Імітаційне моделювання за методом Монте-Карло (англ. Monte Carlo simulation) – статистичний метод, що використовують для виявлення сукупних змін в системі сукупності вхідних даних, які мають визначений розподіл та пов'язані з результатом визначеними взаємозв'язками.

26. Байєсова статистика і мережі Байєса (англ. Bayesian statistics and Bayes nets) – статистичний метод, що передбачає використання даних апіорного розподілу для оцінювання ймовірності результату.

27. Криві FN (англ. FN curve) – спосіб графічного зображення ймовірності подій, які спричиняють рівень шкоди для популяції. Криві FN показують накопичену частоту (F), з якою N чи більше представників популяції зазнаватимуть впливу.

28. Показники ризику (англ. Risk index) – кількісна оцінка міри ризику, отриманою з використанням бальних оцінок на основі порядкових шкал, які дають змогу привести низки чинників, що впливають на рівень ризику, до єдиної числової бальної оцінки цього рівня.

29. Матриця «наслідок/ймовірність» (англ. Consequence/probability matrix) – засіб поєднання якісних та кількісних оцінок наслідків та ймовірностей для визначення рівнів ризику чи їх ранжування.

30. Аналізування витрат і вигід (CBA) (англ. Cost/benefit analysis) – метод оцінювання ризику, за яким загальні очікувані витрати порівнюються з загальними очікуваними вигодами з метою вибору найкращого / найрентабельнішого варіанту.

31. Багатокритеріальний аналіз рішень (MCDA) (англ. Multi-criteria decision analysis, MCDA) – метод, що використовує низку критеріїв для оцінювання загальної цінності сукупності варіантів (формування матриці варіантів і критеріїв, ранжованих і агрегованих для отримання бальної оцінки варіантів).

Г.2 Огляд програмних засобів управління ризиками

Проведено порівняльний аналіз топ-5 існуючих програмних засобів для управління ризиками, результат чого продемонстровано в таблиці Д.1.

1. Onspring [58] – комплексна платформа для управління ризиками, що підтримує налаштування робочих процесів, автоматизацію звітності та моніторинг контролю. Має гнучкі можливості інтеграції з іншими системами.

2. Checkbox [59] – інструмент автоматизації ризик-менеджменту, орієнтований на створення динамічних чек-листів і шаблонів для оцінки ризиків; дозволяє швидко адаптувати процеси під специфіку організації.

3. Qualityze Suite [60] – система управління якістю з розширеними функціями для аналізу та контролю ризиків, інтегрована з Salesforce; забезпечує повний цикл управління невідповідностями та діями для коригування процесів.

4. Wrike [61] – багатофункціональна платформа для управління проектами з можливістю відстеження ризиків на рівні задач та проектів, орієнтована на колаборації та управління командами.

5. AuditBoard [62] – спеціалізована система для аудиту, контролю та управління ризиками, що включає модулі для відповідності нормативним вимогам, управління інцидентами та відстеження ризиків у режимі реального часу.

Таблиця Г.1 – Порівняння програмного забезпечення для управління ризиками [розроблено автором]

Функціонал	Onspring	Checkbox	Qualityze Suite	Wrike	AuditBoard
Risk Scoring	+	+	-	+	+
Audit Management	+	+	+	+	+
Risk Reporting	+	+	-	+	+
Predictive Analytics	+	-	-	-	-
Exceptions Management	+	+	-	+	+
Mobile Access	+	+	+	+	+
Business Process Control	+	+	-	+	+
Legal Risk Management	+	+	-	-	+
Alerts/Notifications	+	+	+	+	+
Operational Risk Management	+	+	-	+	+
Compliance Management	+	+	+	+	+

Продовження таблиці Г.1					
Corrective and Preventive Actions (CAPA)	+	-	+	-	+
Internal Controls Management	+	+	-	+	+
Dashboard	+	+	+	+	+
Risk Assessment	+	+	+	+	+
IT Risk Management	+	+	-	+	+
Reputational Risk Management	+	+	-	+	+
Response Management	+	+	-	+	+
Incident Management	+	+	+	+	-
Data Visualization	+	+	+	-	+
Version Control	+	+	+	+	+
Approval Process Control	+	+	+	+	+
Audit Trail	+	+	+	+	+
Policy Management	+	+	+	+	+
Configurable Workflow	+	+	+	+	+
Security Auditing	-	-	+	+	-
Risk Analysis	+	-	+	+	+
Training Management	+	-	+	-	+
Forms Management	+	+	+	+	+
Dashboard Creation	+	+	+	+	+
Reporting/Analytics	+	+	-	+	+
Customizable Templates	+	+	+	+	+
Customizable Reports	+	+	+	+	+
Vendor Management	+	+	-	+	+
Task Management	+	+	+	+	+
API	+	+	+	+	+
Third-Party Integrations	+	+	+	+	+
Real Time Reporting	+	+	+	+	-
Assessment Management	+	+	+	+	+
Workflow Management	+	+	+	+	+
Document Management	+	+	+	+	+
Document Storage	+	+	+	-	+
Reminders	+	+	-	+	+
Risk Alerts	+	-	+	+	+
Activity Tracking	+	+	+	+	-
Real-Time Monitoring	+	+	+	-	+
All ISO 31010 methods implementation	-	-	-	-	-
47 / +	45	40	32	39	41

Відповідно до таблиці Г.1, на даний момент найкращим вибором є програмне забезпечення «Onspring», яке набрало 45 з 47 відміток про наявність зазначених функцій в своєму програмному середовищі. Однак жодна з систем не реалізує всі методи оцінювання ризиків, рекомендовані стандартом ISO 31010, що свідчить про обмежену методологічну гнучкість.

ДОДАТОК Д

Засоби запобігання та усунення типових ризиків в ІТ-проектах

Таблиця Д.1 – Засоби запобігання та усунення економічного ризику в ІТ-проектах

№	Заходи щодо запобігання ризиків	Заходи щодо усунення ризиків
1.	Постійний моніторинг економічної кон'юнктури	Перепланування бюджету та реорганізація боргових зобов'язань
2.	Бюджетне резервування	Пошук додаткового джерела фінансування
3.	Активна стратегія управління оборотними коштами	Аналіз причин ризику
4.	Аналіз кредитного ризику	Реформування стратегії бізнесу
5.	Аналіз ринкових трендів і технологічних інновацій	Диверсифікація ділових операцій
6.	Стратегічне планування	Перегляд умов контрактів
7.	Управління витратами	Залучення додаткового фінансування
8.	Підвищення фінансової грамотності персоналу	Створення додаткових резервів для подальшої невизначеності
9.	Підтримка гнучкості та адаптивності в організації	Оптимізація використання ресурсів, включаючи людські, фінансові та матеріальні ресурси
10.	Активна участь у бізнес-спільноті та індустріальних асоціаціях	Впровадження стратегії відновлення довіри клієнтів, партнерів та інвесторів

Таблиця Д.2 – Засоби запобігання та усунення ринкового ризику в ІТ-проектах

№	Заходи щодо запобігання ризиків	Заходи щодо усунення ризиків
1.	Постійний моніторинг ринку	Перепланування бюджету
2.	Бюджетне резервування	Підбір нових замовників/клієнтів
3.	Фіксація ціни на договірній основі	Пошук та розробка нових продуктів або послуг, які можуть зменшити залежність від конкретних ринків або секторів
4.	Альтернативна база замовників/клієнтів	Впровадження стратегій різноспрямованого маркетингу та реклами для залучення різних сегментів аудиторії та зменшення ризиків, пов'язаних з концентрацією клієнтів у певних секторах чи регіонах
5.	Диверсифікація портфеля продуктів або послуг	Впровадження програми диверсифікації портфеля продуктів або послуг
6.	Аналіз і прогнозування тенденцій ринку для вчасного реагування на зміни	Активна робота з підвищенням лояльності клієнтів та розширенням ділових відносин з існуючими клієнтами
7.	Ретельний аналіз конкурентного середовища та реакція на дії конкурентів	Розробка стратегії глобальної експансії для виходу на нові ринки та зменшення впливу регіональних чи секторальних ризиків
8.	Вдосконалення стратегій та процесів маркетингу	Залучення консультантів з досвідом управління ринковими ризиками
9.	Встановлення партнерських відносин з ключовими замовниками та клієнтами	Активізація резервних планів діяльності компанії
10.	Постійне вдосконалення стратегій та методів управління ринковими ризиками	Встановлення систем контролю та моніторингу, щоб уникнути подібних ризиків у майбутньому

Таблиця Д.3 – Засоби запобігання та усунення ризику зміни вимог в ІТ-проектах

№	Заходи щодо запобігання ризиків	Заходи щодо усунення ризиків
1.	Чітке визначення вимог	Аналіз вимог і ризиків
2.	Стратегічне планування	Перепланування етапів проекту
3.	Використання гнучких методологій розробки	Оновлення документації
4.	Регулярний зворотний зв'язок та спілкування зацікавлених сторін	Здійснення відкритої комунікації з клієнтами, замовниками та іншими зацікавленими сторонами щодо погодження змін вимог та подальших дій компанії

Продовження таблиці Д.3		
5.	Встановити ефективні механізми контролю та моніторингу, щоб вчасно виявляти та виправляти будь-які невідповідності новим вимогам	Забезпечення постійного моніторингу ситуації та процесів, щоб своєчасно реагувати на будь-які подальші зміни та удосконалити систему управління компанією
6.	Дослідити можливості адаптації продуктів або послуг компанії, внесення необхідних змін для відповідності новим вимогам	Запровадити гнучкість у виробництві та бізнес-процесах, щоб швидко реагувати на подібні зміни в майбутньому

Таблиця Д.4 – Засоби запобігання та усунення ризику якості програмного забезпечення в ІТ-проєктах

№	Заходи щодо запобігання ризиків	Заходи щодо усунення ризиків
1.	Визначити чіткі вимоги	Визначити першопричину
2.	Дотримуватись найкращих практик програмування	Визначити пріоритетність питань
3.	Проведення сесій огляду коду	Впровадити виправлення
4.	Впровадження та підтримка автоматизованого тестування	Регресійне тестування
5.	Безперервна інтеграція/безперервне розгортання (CI/CD)	Автоматизоване тестування
6.	Статичний аналіз коду	Огляд коду
7.	Тестування продуктивності	Постійний моніторинг додатку
8.	Тестування безпеки	Моніторинг відгуків користувачів
9.	Документування та обмін знаннями	Реагування на повідомлення про помилки
10.	Навчання та тренування персоналу	Документування та обмін знаннями
11.	Зворотній зв'язок	Постійне вдосконалення

Таблиця Д.5 – Засоби запобігання та усунення ризику кібербезпеки в ІТ-проєктах

№	Заходи щодо запобігання ризиків	Заходи щодо усунення ризиків
1.	Регулярні оцінки ризиків для виявлення потенційних вразливостей і загроз для ІТ-систем і даних	Ізоляції та усунення загрози
2.	Навчання та підвищення обізнаності працівників	Відновлення даних з резервних копій
3.	Надійні механізми аутентифікації	Перевірка вразливостей і підвищення безпеки.
4.	Регулярні оновлення програмного забезпечення та управління виправленнями	Аналіз причин інциденту
5.	Використання брандмауерів та систем виявлення / запобігання вторгненням	Підвищення обізнаності персоналу
6.	Шифрування даних	Безперервний моніторинг і подальше спостереження
7.	Управління доступом	Заходи пом'якшення впливу
8.	Регулярне резервне копіювання даних	Комп'ютерний криміналістичний аналіз
9.	Моніторинг безпеки та реагування на інциденти	Запобігання повторним інцидентам
10.	Оцінка безпеки постачальника ПЗ	Планування та тренування реагування на інциденти в реальному часі
11.	Безпечне керування конфігурацією	Застосування технологій штучного інтелекту та машинного навчання
12.	Безперервне навчання та вдосконалення безпеки, створення ситуаційних центрів кібербезпеки (SOC)	Співпраця зі сторонніми кібербезпековими експертами, CERT-організаціями

ДОДАТОК Е

Структура бази даних СППР «Decisioner»

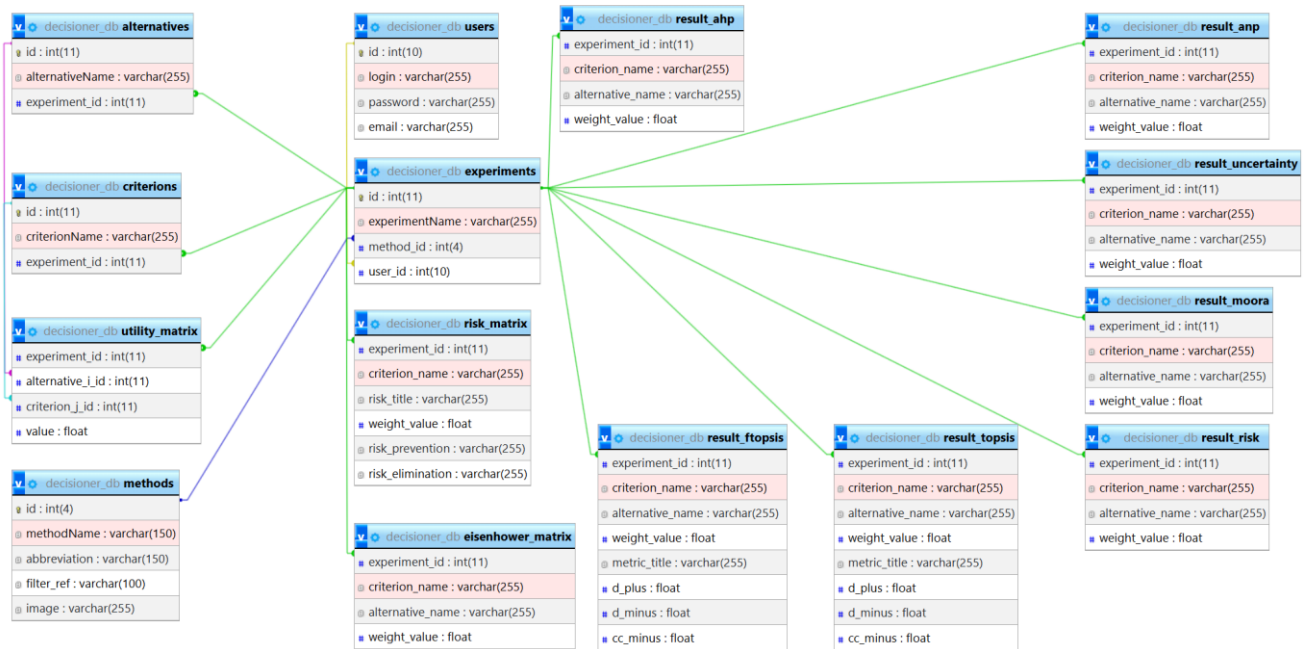


Рисунок Е.1 – Структура бази даних для СППР

Таблиця Е.1 – Перелік таблиць та їх призначення в базі даних

Назва таблиці	Призначення
alternatives	Містить в собі збережені альтернативи з реалізованих методів в системі підтримки прийняття рішень
criteria	Зберігає в собі критерії з реалізованих методів в системі підтримки прийняття рішень
experiments	Містить в собі збережену назву експерименту та його дані
methods	Містить в собі назви методів, які доступні в СППР
result_ahp	Зберігає результати розрахунків за методом аналізу ієрархій
result_uncertainty	Зберігає результати розрахунків прийняття рішень в умовах повної невизначеності
result_risk	Зберігає результати розрахунків прийняття рішень в умовах ризику
result_moora	Зберігає результати розрахунків за методом аналізу співвідношень
result_anp	Зберігає результати розрахунків за методом аналітичних мереж
result_topsis	Зберігає результати розрахунків за методом порядку переваги за подібністю до ідеального рішення
result_ftopsis	Зберігає результати розрахунків за нечітким методом порядку переваги за подібністю до ідеального рішення
risk_matrix	Зберігає результати розрахунків за комбінованим методом матриці ризиків
eisenhower_matrix	Зберігає результати розрахунків за комбінованим матриці Ейзенхауера
users	Містить в собі дані про зареєстрованих користувачів системи
utility_matrix	Дана таблиця зберігає значення вхідних матриць реалізованих методів в системі підтримки прийняття рішень

ДОДАТОК Ж

Інструкція користувача веб-орієнтованої СППР «Decisioner»

До впровадженної СППР «Decisioner» можна перейти за допомогою пункту меню «Програмне забезпечення» на головному сайті кафедри комп'ютерних наук та системного аналізу (КНСА) ЧДТУ – <https://knsa.chdtu.edu.ua> (рис. Ж.1).

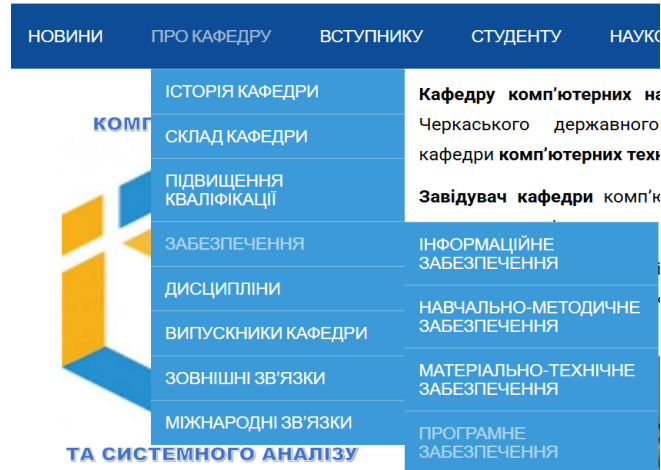


Рисунок Ж.1 – Перехід до СППР «Decisioner» з сайту кафедри КНСА

Головна сторінка інформаційно-реєстраційної частини системи підтримки прийняття рішень «Decisioner» знаходиться за посиланням: <https://dss.knsa.chdtu.edu.ua> (рис. Ж.2).

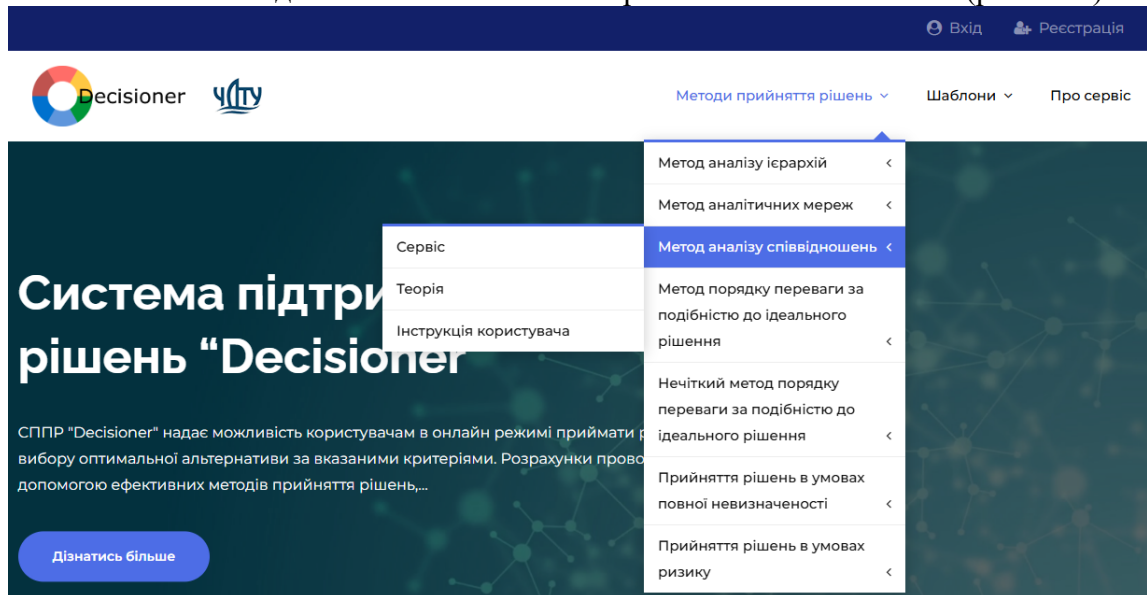


Рисунок Ж.2 – Головна сторінка інформаційно-реєстраційної частини СППР
Секція top-header. Секція містить посилання на реєстрацію та вхід (рис. Ж.2).

Секція header. Дана секція включає в себе логотип СППР «Decisioner», який є посиланням на домашню сторінку СППР. Також в цій секції є меню сайту. Пункти меню «Методи прийняття рішень» та «Шаблони» мають випадаючі списки (рис. Ж.2).

Секція main-slider. Дана секція включає в себе слайдер, в якому завантажені три сторінки з короткою інформацією про систему та реалізовані методи в ній. При натисненні на кнопку «Дізнатись більше» відбувається перехід на повну версію інформаційної сторінки (рис. Ж.2).

Секція «Наші сервіси». Дана секція включає в себе інформацію про методи, якими можна скористатись в СППР «Decisioner». В описі сервісу на плитці наведено коротку теоретичну інформацію про певний метод. При натисненні на назву методу на плитці або на його іконку, користувач може почати розв'язувати задачу за обраним методом за умови його попереднього реєстрації та авторизації на сайті (рис. Ж.3).

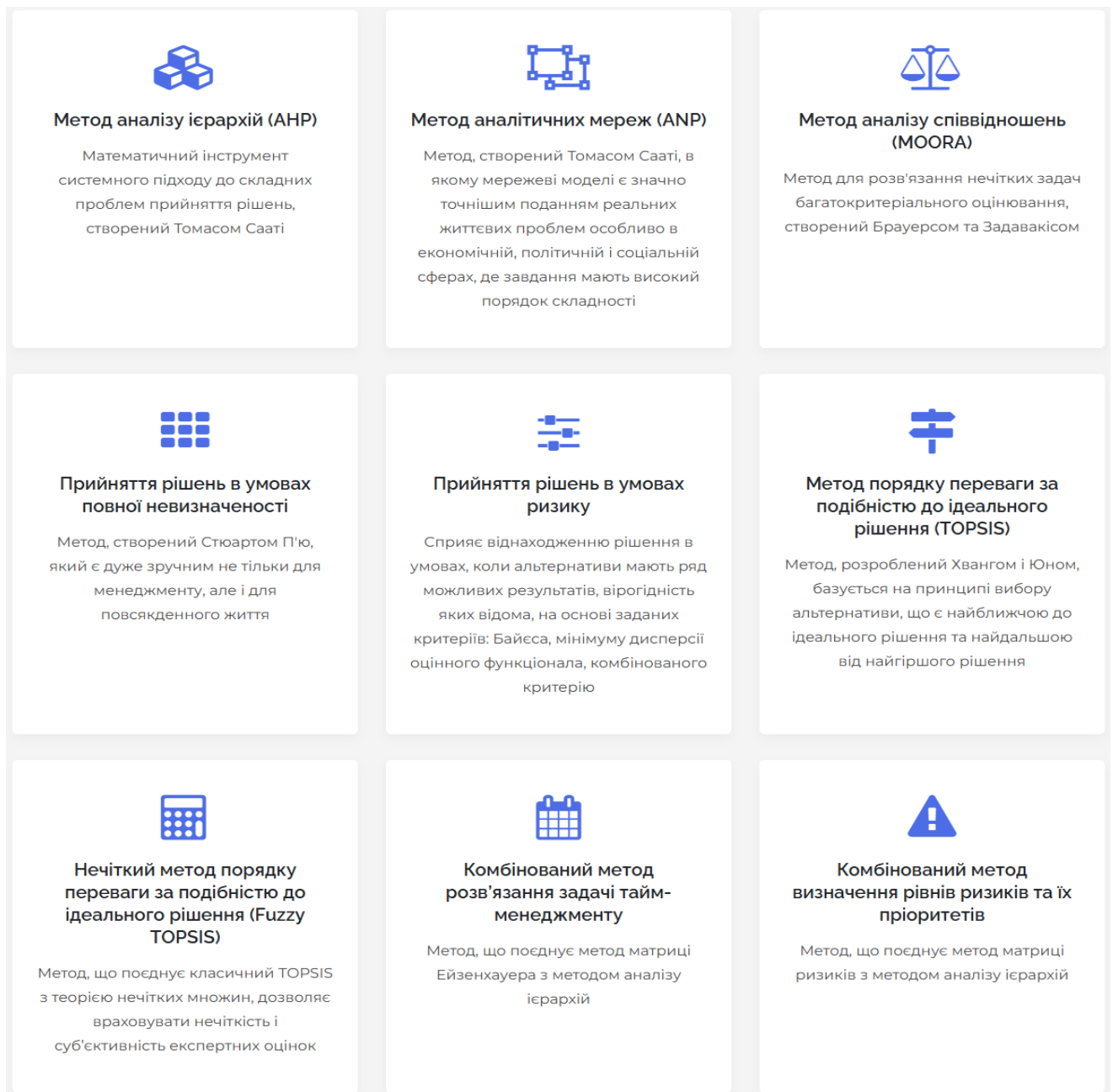


Рисунок Ж.3 – Вигляд секції «Наші сервіси»

Секція «Про сервіс». Дана секція включає в себе коротку інформацію про СППР «Decisioner» (рис. Ж.4). При натисненні на кнопку «Дізнатись більше» користувача буде переадресовано на сторінку <https://dss.knsa.chdtu.edu.ua/about>.

Про сервіс

СППР "Decisioner" надає можливість користувачам в онлайн режимі приймати рішення щодо вибору оптимальної альтернативи за вказаними критеріями. Розрахунки проводяться за допомогою ефективних методів прийняття рішень, серед яких:

- метод аналізу ієрархій
- метод аналітичних мереж
- метод аналізу співвідношень
- прийняття рішень в умовах повної невизначеності
- прийняття рішень в умовах ризику ...

Дізнатись більше



Рисунок Ж.4 – Вигляд секції «Про сервіс»

Секція «footer». Дана секція включає в себе 3 віджети та надпис копірайту (рис. Ж.5). Перший віджет: «Мапа сайту», який займає ліву секцію «підвалу» сайту. Другий та третій віджети знаходяться в правій частині «підвалу» сайту: «Архів записів» та «Пошук по сайту».

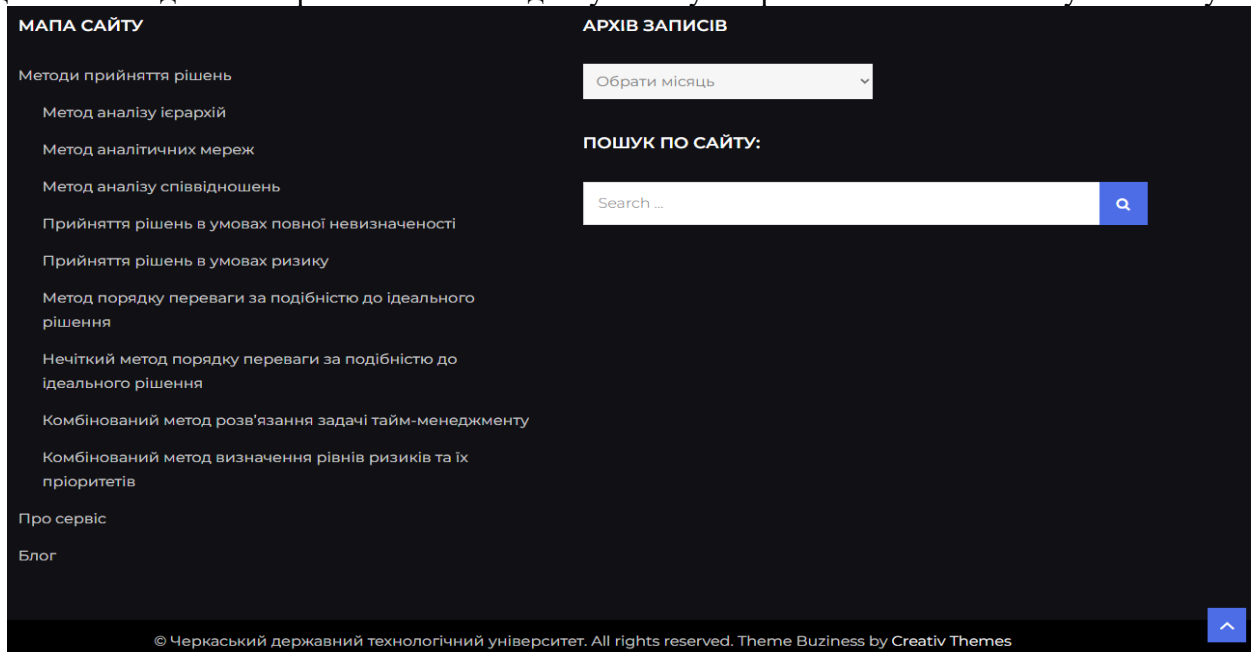


Рисунок Ж.5 – Вигляд секції «footer»

В інформаційно-реєстраційній частині СППР «Decisioner» можна отримати доступ до теоретичних відомостей та до інструкції користувача з реалізованих в ній методів прийняття рішень. Дана частина написана за допомогою CMS WordPress.

Реалізація реєстрації та авторизації. Для початку роботи з СППР «Decisioner» необхідно увійти або зареєструватись в системі. Реєстрація передбачає ухвалення вашого акаунту адміністратором. У разі його схвалення вам буде надіслано повідомлення з вказівками до подальших дій для отримання повноцінного доступу до СППР. Форма реєстрації знаходиться за посиланням: <https://dss.knsa.chdu.edu.ua/registration-dss>, її вигляд наведено на рисунку Ж.6. Дана форма містить в собі 9 обов'язкових до заповнення полів: Email, Логін, Прізвище, Ім'я, По батькові, Установа, Посада, Пароль, Повторіть пароль. Форма містить в собі 1 необов'язкове поле: Телефон. Також в формі реєстрації необхідно пройти reCAPTCHA.

Надіслати

Рисунок Ж.6 – Форма реєстрації в СППР «Decisioner»

Після натиснення на кнопку «Надіслати» за умови успішного заповнення всіх обов'язкових полів та проходження reCAPTCHA користувач отримає підтвердження відправки форми реєстрації адміністратору (рис. Ж.7).

Ваші дані надіслано адміністратору сайту на розгляд. Інформація про можливість доступу до системи підтримки прийняття рішень "Decisioner" буде надіслана на вказаний e-mail.

Якщо Ви не отримали відповідь **впродовж доби**, перевірте на вказаній пошті спам або напишіть на пошту адміністратору за адресою studman@knsa.chdtu.edu.ua.

Рисунок Ж.7 – Підтвердження відправки форми реєстрації адміністратору

Якщо користувач не заповнив обов'язкове до заповнення поле або не пройшов reCAPTCHA, система не відправить запит на реєстрацію адміністратору системи.

Інформація із заповненої форми надходить адміністратору на пошту, де він може підтвердити або відхилити запит на реєстрацію на основі введених користувачем даних для реєстрації в СППР «Decisioner» (рис. Ж.8). Інформація надходить на пошту майже миттєво та не потрапляє у спам, оскільки для передачі e-mail повідомлень використовується SMTP-протокол (англ. Simple Mail Transfer Protocol – Простий Протокол Пересилання Пошти).

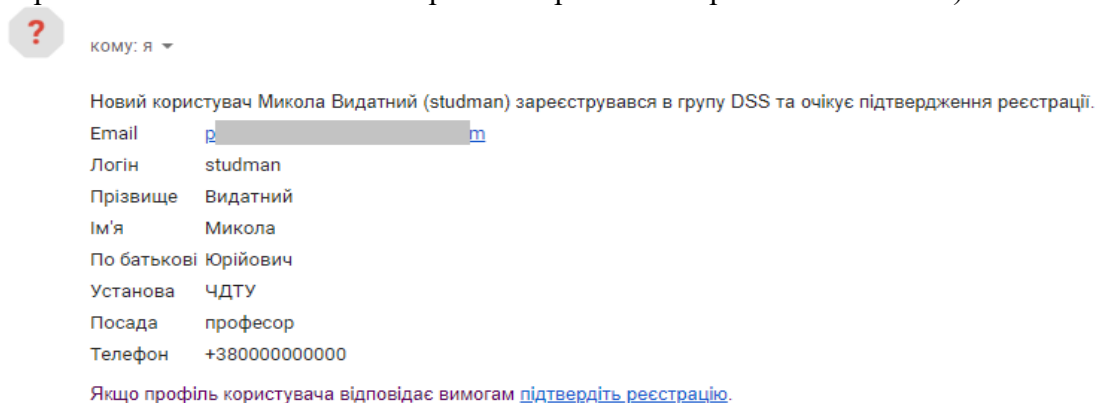


Рисунок Ж.8 – Сповіщення адміністратора про нову заявку на реєстрацію

При натисненні на посилання «Підтвердіть реєстрацію» адміністратора буде перенаправлено в адміністративний кабінет в CMS WordPress для редагування, видалення (відхилення) або ухвалення заявки на реєстрацію, як це продемонстровано на рисунку Ж.9.

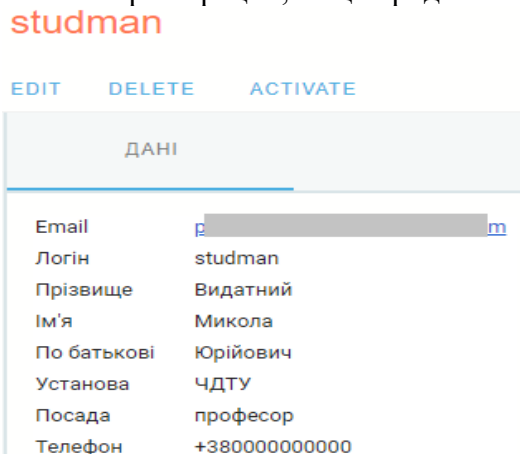


Рисунок Ж.9 – Відображення заявки в CMS WordPress в розділі адміністрування

В залежності від рішення адміністратора користувачу прийде e-mail сповіщення на вказану електронну пошту при реєстрації.

Форма авторизації знаходиться за посиланням (рис. Ж.10 а): <https://decisioner.knsa.chdtu.edu.ua/login.php>, при введенні неправильних даних користувача буде про це проінформовано, як це продемонстровано на рисунку Ж.10 б.

Авторизований користувач може перейти до необхідного шаблону для розв'язку задач в ІТ-галузі за допомогою пункту меню «Шаблони» на головній сторінці підсистеми підтримки прийняття рішень (рис. Ж.11). Головна сторінка підсистеми підтримки прийняття рішень знаходиться за посиланням: <https://decisioner.knsa.chdtu.edu.ua>.

а) б)

Рисунок Ж.10 – Зліва – форма авторизації; справа – сповіщення користувача про некоректно введені дані при авторизації в СППР «Decisioner»

Рисунок Ж.11 – Головна сторінка підсистеми підтримки прийняття рішень

Секція header. Дана секція включає в себе логотип СППР «Decisioner», який є посиланням на його домашню сторінку. В залежності від ролі користувача ця секція має два можливі вигляди: для неавторизованих та авторизованих користувачів.

Секція tiles. Дана секція включає в себе плитку із асоціативним зображенням та назвою доступних методів в СППР «Decisioner» (рис. Ж.11).

В СППР «Decisioner» налаштовано варіативне відображення контенту в залежності від статусу користувача. Якщо користувач неавторизований (гість), він не зможе продовжити виконання методів в системі далі 2 кроку, як це зображено на рисунку Ж.12. Відповідно, в авторизованого користувача такого обмеження немає.

Крок 2

Заповніть матрицю парних порівнянь критеріїв відносно мети:

#	K1	K2
K1	1	3
K2	1/3	1

#	Варі
K1	0.7500
K2	0.2500

Dim	Lmax	IO	BO
2.0000	2.0000	0.0000	

Правило транзитивності не порушено, оскільки $BO \leq 0.1$. Оцінки змін не потребують.

Для продовження розрахунків вам необхідно **зареєструватись** або **увійти** в акаунт

Рисунок Ж.12 – Обмеження для незареєстрованого користувача

Користувач може зберегти розрахунки у власному кабінеті за допомогою кнопки «Зберегти та перейти в особистий кабінет», яка буде доступна в кінці розрахунків кожного методу (рис. Ж.13). Результат збереження розв’язаних задач в особистому кабінеті користувача наведено на рисунку Ж.14.

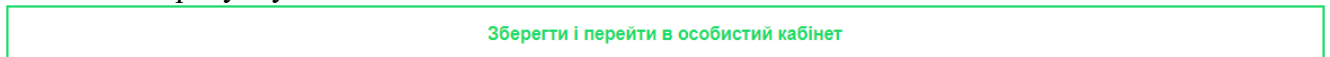


Рисунок Ж.13 – Кнопка для збереження результатів обрахунків



[Перейти в особистий кабінет](#)

Шаблони

Вийти (1)

Список розв'язаних задач

<p>Шаблон для вибору оптимальної медичної інформаційної системи</p> <p>Метод: Метод аналізу ієрархій</p> <p>Відкрити</p>	<p>Вибір оптимальної медичної інформаційної системи</p> <p>Метод: Метод аналізу ієрархій</p> <p>Відкрити</p>
---	---

Рисунок Ж.14 – Вигляд списку розв’язаних задач в особистому кабінеті користувача

При перегляді збереженої задачі користувач може одразу перейти до розв’язку наступної задачі за визначеним методом за допомогою кнопки «Розв’язати іншу задачу» (рис. Ж.15). Також користувач може видалити збережену задачу, якщо натисне на кнопку «Видалити» (рис. Ж.15), в цьому випадку з’явиться модальне вікно «Ви впевнені, що хочете видалити розв’язану задачу?», яке наведено на рисунку Ж.15. Якщо користувачу необхідно повернутись до списку усіх розв’язаних задач він може це зробити натиснувши кнопку «Назад» (рис. Ж.15).

Задача : Вибір оптимальної медичної інформаційної системи (02.12.2020 – 18:51)

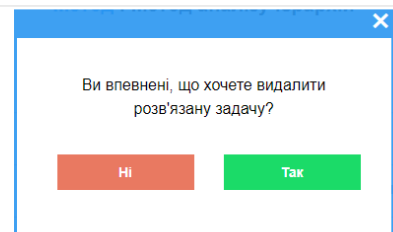
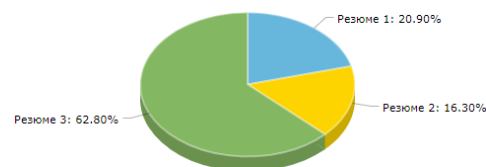
Метод : Метод аналітичних мереж

#	Критерії
1	Вік
2	Досвід роботи в IT
3	Освіта
4	Практичні навички в IT
5	Участь в IT-проектах
6	Заробітна платня

#	Альтернативи
1	Резюме 1
2	Резюме 2
3	Резюме 3

#	Альтернативи	Вага
1	Резюме 1	0.209
2	Резюме 2	0.163
3	Резюме 3	0.628

JS chart by amCharts



Відповідь: Оптимальною є альтернатива А3 (0.628286771915582)

[Назад](#)

[Розв'язати іншу задачу](#)

[Видалити](#)

Рисунок Ж.15 – Збережений розв’язок задачі в особистому кабінеті користувача

Розроблена СППР «Decisioner» містить в собі методи, наведені в таблиці Ж.1.

Таблиця Ж.1 – Реалізовані методи в СППР «Decisioner»

Назва методу	Сервіс	Теоретичні відомості	Інструкція користувача
Метод аналізу ієрархій (АНР)	https://decisioner.knsa.chdtu.edu.ua/experiment.php?id=1	https://dss.knsa.chdtu.edu.ua/ahp-help	https://dss.knsa.chdtu.edu.ua/ahp-tutorial
Метод аналітичних мереж (АНР)	https://decisioner.knsa.chdtu.edu.ua/experiment.php?id=5	https://dss.knsa.chdtu.edu.ua/anp-help	https://dss.knsa.chdtu.edu.ua/anp-tutorial
Метод аналізу співвідношень (MOORA)	https://decisioner.knsa.chdtu.edu.ua/experiment.php?id=3	https://dss.knsa.chdtu.edu.ua/moora-help	https://dss.knsa.chdtu.edu.ua/moora-tutorial
Прийняття рішень в умовах повної невизначеності	https://decisioner.knsa.chdtu.edu.ua/experiment.php?id=2	https://dss.knsa.chdtu.edu.ua/decision-uncertainty-help	https://dss.knsa.chdtu.edu.ua/decision-uncertainty-tutorial
Прийняття рішень в умовах ризику	https://decisioner.knsa.chdtu.edu.ua/experiment.php?id=4	https://dss.knsa.chdtu.edu.ua/risk-help	https://dss.knsa.chdtu.edu.ua/risk-tutorial
Метод порядку переваги за подібністю до ідеального рішення (TOPSIS)	https://decisioner.knsa.chdtu.edu.ua/experiment.php?id=6	https://dss.knsa.chdtu.edu.ua/topsis-help	https://dss.knsa.chdtu.edu.ua/topsis-tutorial
Нечіткий метод порядку переваги за подібністю до ідеального рішення (Fuzzy TOPSIS)	https://decisioner.knsa.chdtu.edu.ua/experiment.php?id=7	https://dss.knsa.chdtu.edu.ua/ftopsis-help	https://dss.knsa.chdtu.edu.ua/ftopsis-tutorial
Комбінований метод розв'язання задачі тайм-менеджменту	https://decisioner.knsa.chdtu.edu.ua/eisenhower_matrix.php	https://dss.knsa.chdtu.edu.ua/eisenhower-help	https://dss.knsa.chdtu.edu.ua/eisenhower-tutorial
Комбінований метод визначення рівнів ризиків та їх пріоритетів	https://decisioner.knsa.chdtu.edu.ua/risk_matrix.html	https://dss.knsa.chdtu.edu.ua/risk-matrix-help	https://dss.knsa.chdtu.edu.ua/risk-matrix-tutorial

Таблиця Ж.2 – Реалізовані шаблони в СППР «Decisioner»

Назва шаблону	Постановка задачі	Розв'язування задачі
Задача кадрового забезпечення	https://dss.knsa.chdtu.edu.ua/cv-anp-formulation	https://decisioner.knsa.chdtu.edu.ua/cv_anp_template.php
Задача технологічного та програмного забезпечення	https://dss.knsa.chdtu.edu.ua/tech-moora-formulation	https://decisioner.knsa.chdtu.edu.ua/tech_moora_template.php
Задача пошуку проєктів	https://dss.knsa.chdtu.edu.ua/project-anp-formulation	https://decisioner.knsa.chdtu.edu.ua/project_anp_template.php
Задача інвестування в ІТ-стартапи	https://dss.knsa.chdtu.edu.ua/startup-risk-formulation	https://decisioner.knsa.chdtu.edu.ua/startup_risk_template.php
Задача інвестування в акції	https://dss.knsa.chdtu.edu.ua/stock-risk-formulation	https://decisioner.knsa.chdtu.edu.ua/stock_risk_template.php
Задача реструктуризації ІТ-компанії	https://dss.knsa.chdtu.edu.ua/restr-risk-formulation	https://decisioner.knsa.chdtu.edu.ua/restr_risk_template.php
Задача реінжинірингу бізнес-процесів ІТ-компанії	https://dss.knsa.chdtu.edu.ua/reeng-moora-formulation	https://decisioner.knsa.chdtu.edu.ua/reeng_moora_template.php
Вибір медичної інформаційної системи	https://dss.knsa.chdtu.edu.ua/mis-ahp-formulation	https://decisioner.knsa.chdtu.edu.ua/mis_ahp_template.php

Продовження таблиці Ж.2		
Шаблон застосування декількох методів багатокритеріального прийняття рішень в межах однієї задачі з агрегуванням результатів	https://dss.knsa.chdtu.edu.ua/multi-madm-formulation	https://decisioner.knsa.chdtu.edu.ua/multi_madm.php

Розглянемо на прикладі застосування методів багатокритеріального прийняття рішень (MADM) для розв'язання задачі прийняття рішень в умовах ризику та невизначеності в межах однієї задачі. Припустимо, що системний архітектор ІТ-компанії, як особа, що приймає рішення (ОПР), планує розпочати новий ІТ-проект, який передбачає розгортання програмного забезпечення у хмарному середовищі. У зв'язку з цим, необхідно здійснити вибір найоптимальнішої хмарної платформи, виходячи з технічних, фінансових та організаційних характеристик.

Розгляд проводиться серед множини альтернатив: $A = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$, де: A_1 – AWS (Amazon Web Services); A_2 – Microsoft Azure; A_3 – Google Cloud Platform; A_4 – DigitalOcean.

Оцінювання здійснюється за множиною критеріїв: $K = \{k_1, k_2, \dots, k_{20}\}$, які включають як кількісні, так і якісні показники. Частина з них потребує максимізації, інша – мінімізації, що визначається змістом кожного критерію. В даному експерименті розглянуті критерії, які потрібно максимізувати, щоб визначити коректність методів.

При цьому ОПР може керуватися, наприклад, такими критеріями оцінювання які потрібно максимізувати: k_1 – Продуктивність (CPU, RAM, IO); k_2 – Надійність (SLA uptime, % доступності); k_3 – Масштабованість (автоматичне реагування на навантаження); k_4 – Географічне покриття (дата-центри в різних регіонах); k_5 – Кількість доступних сервісів / функцій; k_6 – Везпека (наявність сертифікатів, стандартів); k_7 – Простота інтеграції через API; k_8 – UI/UX панелі управління; k_9 – Гнучкість у тарифах, ліцензуванні; k_{10} – Простота міграції (у випадку потреби); k_{11} – Якість технічної підтримки.

Таблиця Ж.3 – Результат заповнення матриці кількісними та якісними вхідними даними

Альтернативи	Критерії											
	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9	k_{10}		
A1	6200	99.99	10	32	200	10	9	8	7	8	9	
A2	5800	99.95	9	60	150	9	8	7	7	8	9	
A3	6000	99.95	9	37	130	9	9	9	8	9	8	
A4	4500	99.90	6	14	25	7	7	8	9	6	6	

Для експерименту було обрано метод MOORA оскільки він в своєму класичному представленні не потребує задання вагових коефіцієнтів, що наближує цей метод MCDA до початкових вхідних даних до методів прийняття рішень в умовах ризику та невизначеності.

Далі наведено розв'язок задачі за допомогою методу MOORA на рисунку Ж.16.

#	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	Вектор суми відхилень	Ранг альтернатив
min/max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max		
A1	0.000	0.000	0.000	0.356	0.000	0.000	0.000	0.062	0.128	0.064	0.000	0.610	1
A2	0.035	0.000	0.058	0.000	0.177	0.057	0.060	0.125	0.128	0.064	0.000	0.704	2
A3	0.018	0.000	0.058	0.292	0.247	0.057	0.000	0.000	0.064	0.000	0.062	0.798	3
A4	0.150	0.000	0.232	0.585	0.619	0.170	0.121	0.062	0.000	0.192	0.185	2.316	4

Рисунок Ж.16 – Розв'язок задачі за допомогою методу MOORA
За методом MOORA найкращою альтернативою є A_1 .

Розв'язок задачі за допомогою методу прийняття рішень в умовах ризику за умови рівної ймовірності наведено на рисунку Ж.17.

Назва критерію	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4	Оптимальне рішення
Байєса	599.363	560.632	575.268	426.173	φ_1 (599.363)
Мінімуму дисперсії	3139997.139	2747197.328	2944411.246	1660299.717	φ_4 (1660299.717)
Модифікація 1	3143478.595	2747608.321	2945629.907	1673338.190	φ_4 (1673338.190)
Модифікація 2	3139997.139	2748697.412	2944991.794	1690294.493	φ_4 (1690294.493)
Комбінований ($\lambda^*=0.099$)	14193.096	12427.659	7967.430	0.000	φ_1 (14193.096)
Комбінований ($\lambda^{**}=0.103$)	-11.444	0.000	-5328.274	-7476.972	φ_2 (0.000)
Комбінований ($\lambda=-0.001$)	364116.377	318578.196	335501.902	184192.291	φ_1 (364116.377)
Комбінований ($\lambda=0.203$)	-349934.726	-306150.536	-332862.747	-191669.263	φ_4 (-191669.263)
Комбінований ($\lambda=0.101$)	7090.826	6213.830	1319.578	-3738.486	φ_1 (7090.826)

Рисунок Ж.17 – Результати обчислення за різними критеріями в умовах ризику

За методом прийняття рішень в умовах ризику найкращою альтернативою є A_1 .

Розв'язок задачі за допомогою методу прийняття рішень в умовах невизначеності наведено на рисунку Ж.18.

#	Розрахунок	Оптимальна альтернатива
1	За критерієм Лапласа	A_1
2	За критерієм Вальда	A_3
3	За критерієм Гурвіца	A_1
4	За критерієм Севіджа	A_1

Рисунок Ж.18 – Результат розрахунків за умов повної невизначеності

За методом прийняття рішень в умовах невизначеності найкращою альтернативою є A_1 .

Як показав експеримент, для кількісних та якісних вхідних значень в будь-якому випадку для прийняття рішень в умовах ризику результати частково співпадають з іншими методами. Методи MOORA та прийняття рішень в умовах невизначеності співпадають.

Проведемо експеримент заповнюючи початкову матрицю тільки якісними даними.

Таблиця Ж.4 – Результат заповнення початкової матриці тільки якісними даними

Альтернативи	Критерії						
	k_3	k_6	k_7	k_8	k_9	k_{10}	k_{11}
A_1	10	10	9	8	7	8	9
A_2	9	9	8	7	7	8	9
A_3	9	9	9	9	8	9	8
A_4	6	7	7	8	9	6	6

Розв'язок задачі за допомогою методу MOORA наведено на рисунку Ж.19.

#	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	Вектор суми відхилень	Ранг альтернатив
min/max	max	max	max	max	max	max	max		
A1	0.000	0.000	0.000	0.062	0.128	0.064	0.000	0.254	2
A2	0.058	0.057	0.060	0.125	0.128	0.064	0.000	0.492	3
A3	0.058	0.057	0.000	0.000	0.064	0.000	0.062	0.241	1
A4	0.232	0.170	0.121	0.062	0.000	0.192	0.185	0.962	4

Рисунок Ж.19 – Розв’язок задачі за допомогою методу MOORA

За методом MOORA найкращою альтернативою є A_3 .

Розв’язок задачі за допомогою методу прийняття рішень в умовах ризику за умови рівної ймовірності наведено на рисунку Ж.20.

Назва критерію	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4	Оптимальне рішення
Байєса	8.714	8.143	8.714	7.000	φ_3 (8.714)
Мінімуму дисперсії	1.061	0.694	0.204	1.143	φ_3 (0.204)
Модифікація 1	1.388	0.694	0.531	2.449	φ_3 (0.531)
Модифікація 2	1.061	1.020	0.204	4.082	φ_3 (0.204)
Комбінований ($\lambda^*=0.977$)	0.694	0.833	1.531	0.000	φ_3 (1.531)
Комбінований ($\lambda^{**}=0.997$)	-0.855	-0.514	0.000	-1.008	φ_3 (0.000)
Комбінований ($\lambda=0.877$)	8.394	7.533	9.146	5.014	φ_3 (9.146)
Комбінований ($\lambda=1.097$)	-8.555	-7.214	-7.614	-6.023	φ_4 (-6.023)
Комбінований ($\lambda=0.987$)	-0.081	0.159	0.766	-0.504	φ_3 (0.766)

Рисунок Ж.20 – Результати обчислення за різними критеріями в умовах ризику

За методом прийняття рішень в умовах невизначеності найкращою альтернативою є A_3 .

Розв’язок задачі за допомогою методу прийняття рішень в умовах невизначеності наведено на рисунку Ж.21.

#	Розрахунок	Оптимальна альтернатива
1	За критерієм Лапласа	A1
2	За критерієм Вальда	A3
3	За критерієм Гурвіца	A1
4	За критерієм Севіджа	A3

Рисунок Ж.21 – Результат розрахунків за умов повної невизначеності

За методом прийняття рішень в умовах невизначеності найкращою альтернативою є A_3 .

Як показав проведений експеримент, результати за методом MOORA, прийняття рішень в умовах ризику та невизначеності співпадають. Це означає що методи MADM можна використовувати для розв’язування задач прийняття рішень в умовах ризику та невизначеності.